



Rodrigo Miguel da Silva Rodrigues

Análise da Aplicação do Betume Modificado com Borracha em Portugal

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil Construção

Orientador: Prof. Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar
Micaelo

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues
Arguente: Prof. Luís Manuel Trindade Quaresma
Vogal: Prof. Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo

Análise da Aplicação do Betume Modificado com Borracha em Portugal

Rodrigo Miguel da Silva Rodrigues
Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para
obtenção do grau Mestre em Engenharia Civil –
– Perfil de Construção

Orientador: Professor Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo

Júri

Presidente: Prof. Doutora Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues

Arguente: Prof. Luís Manuel Trindade Quaresma

Vogal: Prof. Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo

Março, 2012

Copyright

“Copyright” de Rodrigo Miguel da Silva Rodrigues, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A realização desta dissertação e o contudo nela inserido, não seriam possíveis sem a ajuda de algumas pessoas, às quais agradeço.

Um agradecimento ao Professor Doutor Rui Micaelo, meu orientador, pela ajuda e prestação de informação que serviram para a realização deste trabalho.

Ao Dr. António Pedreiro e Eng.º Vasco Pampulim, pelo convite de visita às instalações da Recipneu e pela informação disponibilizada no local.

À Eng.^a Fátima Baptista do LNEC, pela prestação de informação que muito contribui para a elaboração deste trabalho.

Ao Eng.º Hélio Nunes da Repsol, pela disponibilização de informação sobre a empresa no âmbito do tema desta dissertação.

Ao Eng.º Paulo Silva da Valorpneu e à Eng.^a Catarina Santos da Recipav, pelas sugestões de pesquisa que forneceram.

Ao professor Doutor Luís Picado Santos pelas referência bibliográficas que disponibilizou.

Aos meus pais e companheira pelo apoio ao longo do trabalho.

Resumo

As infra-estruturas rodoviárias sofreram uma grande evolução, principalmente a partir da Segunda Guerra Mundial. Em Portugal verificou-se uma evolução de forma mais notória com o desenvolvimento do Plano Rodoviário Nacional 85 (DL 380/85) e com a adesão à CEE em 1985 e posteriormente com o Plano Rodoviário Nacional 2000 (DL 222/98).

Os principais objectivos de evolução das infra-estruturas rodoviárias e dos tipos de pavimentos que as constituem são a tentativa de melhoramento das características mecânicas e a redução de custos proveniente desse melhoramento. Na sequência desta evolução dos pavimentos, surgiu em 1999 a primeira aplicação, em Portugal, de misturas betuminosas com betumes modificados com borracha.

Em Portugal a maioria dos pavimentos são do tipo flexível, razão pela qual esta dissertação abordará apenas esse tipo de pavimentos.

O trabalho baseia-se numa análise das propriedades do betume e da borracha de pneus, na sua interação e no comportamento estrutural e funcional das misturas betuminosas produzidas com estes materiais. Para tal foram analisados vários estudos de forma a perceber esses comportamentos. Do ponto de vista estrutural surgem com o objectivo de melhorar a resistência ao fendilhamento, retardar a reflexão de fendas, aumentar a vida à fadiga, melhorar a resistência às deformações permanentes e formação de rodeiras. Na perspectiva funcional visa essencialmente reduzir o ruído de circulação, aumentar a aderência pneu/pavimento, reduzir o efeito de projecção de água e reduzir o fendilhamento.

Neste documento, existem mais referências aos betumes modificados com alta percentagem de borracha, por ser a técnica com mais aplicações em Portugal e com misturas homologadas pelo LNEC.

Os resultados mostram um aumento da resistência à fadiga, às deformações permanentes e diminuição do ruído dos pavimentos constituídos por misturas betuminosas modificadas com borracha relativamente a outro tipo de misturas. De acordo com o estudo económico simplificado realizado, concluiu-se que a aplicação de misturas betuminosas com BMB tem custos inferiores no final de uma obra de reabilitação da camada de desgaste do pavimento. Pelo contrário, na construção de uma nova infra-estrutura rodoviária os custos apresentados são superiores para a aplicação de misturas com BMB quando comparados com as misturas convencionais.

Palavras-chave:

Pavimentos flexíveis

Misturas betuminosas

Betumes-borracha

Comportamento Mecânico

Reabilitação

Abstract

Road infrastructures experienced a great evolution, mainly since the Second World War. In Portugal there was a more evident trend with the development of National Plan for Roads 85 (DL 380/85) and the accession to the European Economic Community (EEC) in 1985 and later with the development of National Plan for Roads 2000 (DL 222/98).

The main objectives of the development of road infrastructure and the types of pavements that constitute them are the improvement of mechanical properties and the decrease of costs. As a result of this evolution attempt, arose in 1999 the first application in Portugal of bituminous mixtures with asphalt rubber.

In Portugal most pavements are of the flexible type, which is why this thesis will address only this type of pavement.

The work is based on the analysis of properties of the bitumen and tires rubber. For the purpose were analyzed several studies in order to understand the interaction between these materials and the structural and functional behavior of bituminous mixtures produced with these materials. From a structural point of view the use of rubber modified bitumen aims to improve the resistance to cracking, delaying the reflection of cracks, increasing the life to fatigue, improve resistance to permanent deformation and formation of rutting. In a functional perspective seeks primarily to reduce the noise of traffic, increasing the grip tire/pavement, reduce the effect of the projection of water and reduce cracking.

The great reference of this document is the bitumen modified with a high percentage of rubber, because it is a technique with proven results in Portugal and with mixtures approved by LNEC.

Comparing with other type of mixtures, pavements with rubber modified bitumen shows an increase of the resistance to fatigue, permanent deformation and reduction of noise. According with the simplified economic study the pavements with rubber modified bitumen mixes have lower costs in rehabilitation works. On the other hand the construction of a new road infrastructure, the presented costs are superior for the application of rubber modified bitumen in mixtures, when compared with the conventional mixtures.

Keywords:

Flexible Pavements

Bituminous Mixtures

Rubber Modified Bitumen

Mechanical Behavior

Rehabilitation

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação e Enquadramento do Tema.....	1
1.2. Objectivos.....	1
1.3. Estrutura do Trabalho	2
2. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS.....	3
2.1. Introdução.....	3
2.2. Caracterização dos pavimentos rodoviários flexíveis.....	3
2.3. Características gerais das misturas betuminosas	6
2.3.1. Materiais constituintes	6
2.3.1.1. Agregados	6
2.3.1.2. Betumes	8
2.3.2. Formulação e propriedades das misturas betuminosas.....	11
2.3.2.1. Resistência à fadiga	12
2.3.2.2. Módulo de deformabilidade.....	14
2.3.2.3. Deformações permanentes	15
2.3.2.4. Ruído	17
2.3.2.5. Aderência.....	18
2.3.2.6. Sensibilidade à Água	20
2.4. Dimensionamento das estruturas de pavimentos.....	20
2.5. Patologias	22
2.5.1. Deformações	23
2.5.2. Fendilhamento.....	24
2.5.3. Desagregação da camada de desgaste	25
2.5.4. Movimento dos materiais.....	25
3. MISTURAS BETUMINOSAS COM ADIÇÃO DE BETUME MODIFICADO COM BORRACHA	27
3.1. Introdução.....	27
3.2. Borracha de pneus em fim de vida útil	27
3.3. Propriedades dos pneus	30
3.4. Processos de Obtenção do granulado de borracha	31
3.5. Betumes Modificados com Borracha (BMB).....	35
3.5.1. Introdução	35
3.5.2. Métodos de Fabrico das Misturas BMB.....	36
3.5.2.1. Método por via húmida.....	37
3.5.2.2. Método por Via Seca	39
3.5.3. Propriedades do betume-borracha.....	39
3.5.4. Produção das misturas com BMB em Portugal.....	46

4. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS MISTURAS BETUMINOSAS COM BMB EM PORTUGAL	49
4.1. Introdução	49
4.2. Resistência à Fadiga e Módulo de deformabilidade	50
4.3. Deformações Permanentes	68
4.4. Ruído	74
4.5. Sensibilidade à Água	80
5. RESULTADOS.....	83
5.1. Análise de Resultados dos Estudos	83
5.2. Análise Económica	85
5.3. Vantagens e Desvantagens de misturas com BMB.....	98
5.3.1. Vantagens Estruturais e Funcionais	98
5.3.2. Vantagens Ambientais	98
5.3.3. Vantagens Económicas	98
5.3.4. Desvantagens	99
6. CONCLUSÕES	101
6.1. Considerações Finais.....	101
6.2. Investigação Futura	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

Índice de Figuras

Figura 2. 1 - Pavimento Rodoviário: constituição e acções (Branco <i>et al.</i> , 2008)	4
Figura 2. 2 - Comportamento e constituição do Pavimento Flexível (Branco <i>et al.</i> , 2008).....	5
Figura 2. 3 - Subdivisão química do betume (Textos Científicos, 2008).....	8
Figura 2. 4 - Esquema do ensaio de compressão de Marshall (Branco <i>et al.</i> , 2008).....	12
Figura 2. 5 - Exemplo do esquema de ensaio à flexão simples em 4 pontos (Sousa <i>et al.</i> , 2004)	13
Figura 2.6 - Ábaco de previsão do módulo de deformabilidade segundo manual de dimensionamento da SHELL (Picado Santos, (1995) citado em Branco <i>et al.</i> , (2008)).....	15
Figura 2. 7 – Equipamentos de pequenas dimensões (esq.) e de grandes dimensões (dir.) (LNEC _A , 2012).....	16
Figura 2. 8 - Sonómetro (Ruivo _A , 2004)	18
Figura 2. 9 - Exemplo de ensaio <i>Grip-Tester</i> (LNEC, 2011).....	20
Figura 2. 10 - Rodeira de grande raio (Estrada IC20 Acessos – Almada, 2011)	23
Figura 2. 11 - Fenda Longitudinal (Rua Infante D. Henrique – Seixal, 2011).....	24
Figura 2. 12 - Pele de Crocodilo (Avenida de Vale de Milhaços – Seixal, 2011).....	24
Figura 2. 13 – Cova (Avenida de Vale de Milhaços – Seixal, 2011).....	25
Figura 3. 1 – Depósito de pneus a céu aberto (Azinheiragate.Blogspot, 2008)	28
Figura 3. 2 - Evolução dos pneus colocados, gerados e recolhidos no mercado (Valorpneu _A , 2010)	29
Figura 3. 3 - Diferentes aplicações da borracha em pavimentos em 2010 (Valorpneu _A , 2011).....	30
Figura 3. 4 - Materiais constituintes do pneu (Valorpneu, 2010).....	30
Figura 3. 5 - Esquema representativo do processo mecânico (Fontes, 2009)	32
Figura 3. 6 - 1ª fase de trituração (Recipneu, 2010).....	33
Figura 3. 7 - Túnel Criogénico (Recipneu, 2010)	33
Figura 3. 8 - Embalamento do pó de borracha (Recipneu, 2010).....	34
Figura 3. 9 - Carregamento para transporte (Recipneu, 2010)	34
Figura 3. 10 - Morfologia e forma das partículas de borracha “chips” (Pampulim, 2010)	35
Figura 3. 11 - Pó de borracha com dimensão ≤ 6 mm.....	35
Figura 3. 12 - Diferentes fases da reacção betume-borracha (adaptado de Holleran & Reed (2000) citado em Fontes (2009)).....	36
Figura 3. 13 - (a) Unidade móvel para modificação do betume	38
Figura 3. 14 - Processo Contínuo Blend (Recipav, 2005)	38
Figura 3. 15 - Caracterização ponderal das misturas com BMB da Recipav (Recipneu, 2010)	43
Figura 3. 16 - Exemplo de camada de desgaste com BMB com alta percentagem de borracha (Probialp, 2011).....	44
Figura 3. 17 - Curvas granulométricas tipo utilizadas em misturas betuminosas (Fontes, 2009)	47
Figura 4. 1 - Módulos de deformabilidade para frequências de 5 e 10 Hz (Quaresma <i>et al.</i> , 1999)	50
Figura 4. 2 - Leis de fadiga obtidas para as duas misturas em estudo (Quaresma <i>et al.</i> , 1999)	51
Figura 4. 3 - Produção de BMB em laboratório (Antunes <i>et al.</i> , 2000)	52

Figura 4. 4 - Leis de fadiga para amostras retiradas de obra (Antunes <i>et al.</i> , 2000)	53
Figura 4. 5 - Provetes retirados após seis anos de serviço (Baptista <i>et al.</i> , 2006)	54
Figura 4. 6 - Resistência à fadiga (Baptista <i>et al.</i> , 2006)	55
Figura 4. 7 - EN 104, pavimento modificado e convencional (Recipav, 2009)	55
Figura 4. 8 - Curva granulométrica das misturas SBS (Pestana <i>et al.</i> , 2006)	57
Figura 4. 9 - Curva granulométrica das misturas BMB (Pestana <i>et al.</i> , 2006)	57
Figura 4. 10 - Leis de Fadiga (Pestana <i>et al.</i> , 2006)	58
Figura 4. 11 - Estabilidade das misturas modificadas com BMB em estudo (Pais <i>et al.</i> , 2008)	59
Figura 4. 12 - Baridade aparente das misturas modificadas com BMB em estudo (Pais <i>et al.</i> , 2008)	60
Figura 4. 13 - Evolução da porosidade das misturas com BMB em estudo (Pais <i>et al.</i> , 2008)	60
Figura 4. 14 - Lei de fadiga para as misturas em estudo (Pais <i>et al.</i> , 2008)	61
Figura 4. 15 - Resistência à fadiga (Sousa <i>et al.</i> , 2004)	62
Figura 4. 16 - Comparação da vida à fadiga entre as misturas em estudo (Sousa <i>et al.</i> , 2004)	63
Figura 4. 17 - Valores da resistência à fadiga para os dois tipos de mistura (Miranda <i>et al.</i> , 2008)	64
Figura 4. 18 - Módulo de deformabilidade à temperatura de 20 °C (Dias, 2011)	65
Figura 4. 19 - Módulo de deformabilidade à temperatura de 30 °C (Dias, 2011)	65
Figura 4. 20 - Módulo de deformabilidade à temperatura de 40 °C (Dias, 2011)	66
Figura 4. 21 - Representação das leis de fadiga à temperatura de 20 °C (Dias, 2011)	67
Figura 4. 22 - Representação das leis de fadiga da mistura TA para 20 °C e 30 °C. (Dias, 2011) ..	67
Figura 4. 23 - Representação gráfica das leis de fadiga para a mistura TB3 à temperatura de 20 °C (Dias, 2011)	67
Figura 4. 24 - Representação gráfica das leis de fadiga para a mistura TB3 à temperatura de 30 °C (Dias, 2011)	68
Figura 4. 25 - Resultados para provetes retirados de obra (Antunes <i>et al.</i> , 2000)	69
Figura 4. 26 - Resultados para provetes moldados em laboratório (Antunes <i>et al.</i> , 2000)	70
Figura 4. 27 - Deformações permanentes para as misturas em estudo (Pestana <i>et al.</i> , 2006)	72
Figura 4. 28 - Comparação da resistência ao corte entre as duas misturas (Sousa <i>et al.</i> , 2004)	73
Figura 4. 29 - Fronteira dos pavimentos em estudo (Ruivo, 2004)	75
Figura 4. 30 - Diferença dos pavimentos a estudar, mistura com BMB (esq.) e BBR (dir.) (Ruivo _A , 2004)	76
Figura 4. 31 - Superfície S1 (BBR12) – Camada de desgaste de betão betuminoso rugoso com 1 ano. (Freitas, 2008)	78
Figura 4. 32 - Superfície S2 (BBR6) – Camada de desgaste de microbetão betuminoso rugoso com 2 anos. (Freitas, 2008)	78
Figura 4. 33 - Superfície S3 (MBR – BMB15) – Camada de desgaste de mistura betuminosa rugosa com betume modificado com borracha com 7 anos. (Freitas, 2008)	78
Figura 4. 34 - Superfície S4 (BBD16) – Camada de desgaste de betão betuminoso denso com 10 anos. (Freitas, 2008)	78
Figura 4. 35 - Superfície S5 (MBR7) – Camada de desgaste de microbetão betuminoso rugoso com 4 anos. (Freitas, 2008)	78
Figura 4. 36 - Superfície S6 (MBA – BMB12) – Camada de desgaste de mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha com idade inferior a 1 ano. (Freitas, 2008)	79
Figura 4. 37 - Superfície S7 (MBA – BMB10) – Camada de desgaste de mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha com idade inferior a 1 ano. (Freitas, 2008)	79

Figura 4. 38 - Nível de ruído médio (Freitas, 2008).....	79
Figura 5. 1 - Soluções de pavimentos a estudar	86
Figura 5. 2 - Modelo de carregamento (Silva, 2004)	88
Figura 5. 3 - Resultados obtidos através do programa ALIZE relativos à solução base	89
Figura 5. 4 - Resultados obtidos através do programa ALIZE relativos à solução alternativa 1	89
Figura 5. 5 - Resultados obtidos através do programa ALIZE relativos à solução alternativa 2	90
Figura 5. 6 - Esquema representativo das duas soluções de reabilitação	93
Figura 5. 7 - Resultados obtidos através do programa ALIZE relativos à reabilitação 1	95
Figura 5. 8 - Resultados obtidos através do programa ALIZE relativos à reabilitação 2.....	95

Índice de Quadros

Quadro 2. 1 - Valores base das propriedades dos agregados para camadas de desgaste com misturas betuminosas a quente (CETO-EP – 14.03, 2012).....	7
Quadro 2. 2 - Propriedades e métodos de ensaio dos betumes (CETO-EP – 14.03, 2012).....	9
Quadro 2. 3 – Designação de misturas betuminosas consoante camada (CETO-EP – 14.03, 2012)	13
Quadro 2. 4 - Comparação entre as normas AASHTO TP8-94 e EN 12697-24: 2004.....	14
Quadro 2. 5 - Comparação dos três equipamentos utilizados na EN 12697-22: 2005 (Antunes & Freire, 2006).....	17
Quadro 2. 6 - Valores mínimos de profundidade média de textura superficial em camadas de desgaste (CETO-EP – 15.03, 2009)	19
Quadro 2. 7 - Grupos e tipos de degradações (Pereira e Miranda (1999), citado em Branco (2008)).....	23
Quadro 3. 1 - Composição de pneus ligeiros e pesados (Convenção de Basileia, (1999) citado em Valorpneu, (2010)).....	31
Quadro 3. 2 - Análise Elementar da Borracha (Convenção de Basileia, (1999) citado em Valorpneu, (2010)).....	31
Quadro 3. 3 – Propriedades dos BBB (pr NP 4501: 2010)	41
Quadro 3. 4 – Propriedades dos BBM (pr NP 4501: 2010)	42
Quadro 3. 5 – Propriedades dos BBA (pr NP 4501: 2010)	42
Quadro 3. 6 - Características das misturas MBA e MBR com BMB (LNEC, 2006 e 2008).....	48
Quadro 4. 1 - Valores Nominais das características funcionais e estruturais para as misturas MBA-BMB e MBR-BMB (LNEC, 2006 e 2008).....	49
Quadro 4. 2 - Composição granulométrica das misturas betuminosas em estudo (Quaresma <i>et al.</i> , 1999)	50
Quadro 4. 3 - Características dos diferentes provetes ensaiados (Baptista <i>et al.</i> , 2006)	54
Quadro 4. 4 - Características do betume (Pestana <i>et al.</i> , 2006).....	56
Quadro 4. 5 - Módulo de deformabilidade e ângulo de fase (Pestana, 2006)	58
Quadro 4. 6 - Fuso granulométrico das misturas em estudo (Pais <i>et al.</i> , 2008)	59
Quadro 4. 7 - Módulo de deformabilidade e ângulo de fase de ambas as misturas com BMB em estudo (Pais <i>et al.</i> , 2008)	61
Quadro 4. 8 – Percentagens de borracha, betume, ligante e de borracha relativamente à massa total de ligante para as duas misturas (Dias, 2011)	65
Quadro 4. 9 – Valores do módulo de deformabilidade para a mistura TB3 (Dias, 2011).....	66
Quadro 4. 10 - Resultados do ensaio de simulação de tráfego (Quaresma <i>et al.</i> , 1999)	69
Quadro 4. 11 – Resultados da velocidade de deformação para os diferentes anos de ensaio (Baptista <i>et al.</i> , 2006)	71
Quadro 4. 12 – Resultados da resistência às deformações permanentes (Dias, 2011)	73
Quadro 4. 13 - Dados da curva granulométrica (Ruivo, 2004)	74
Quadro 4. 14 - Resultados dos Ensaio Marshall (Ruivo, 2004).....	74
Quadro 4. 15 - Resultados das medições na Auto-Estrada A8 (Ruivo, 2004)	75

Quadro 4. 16 - Resultados finais (Ruivo _A , 2004)	76
Quadro 4. 17 - Análise comparativa de resultados das duas misturas (Abreu & Coelho, 2007).....	77
Quadro 4. 18 - Propriedades do BMB com alta percentagem de borracha (Baptista <i>et al.</i> , 2008)...	81
Quadro 4. 19 - Granulometria das misturas (Baptista <i>et al.</i> , 2008).....	81
Quadro 4. 20 - Resultados segundo a norma americana (Baptista <i>et al.</i> , 2008).....	82
Quadro 4. 21 - Resultados segundo a norma europeia (Baptista <i>et al.</i> , 2008).....	82
 Quadro 5. 1 – Valores para o Módulo de deformabilidade e Coeficiente de Poisson (MACOPAV, 1995)	 87
Quadro 5. 2 - Definição do eixo relativamente ao carregamento (Silva, 2004)	88
Quadro 5. 3 – Resultados das extensões de tracção e compressão.....	91
Quadro 5. 4 - Características e custos para as diferentes camadas betuminosas.....	91
Quadro 5. 5 - Quantidades e Custos das misturas betuminosas em estudo	91
Quadro 5. 6 – Número de passagens admissíveis para a solução base e solução alternativa 1	92
Quadro 5. 7 - Resultados das extensões de tracção e compressão	96
Quadro 5. 8 – Custo referente às diferentes camadas a aplicar na reabilitação do pavimento	97
Quadro 5. 9 - Número de passagens admissíveis para a reabilitação 1	97

Abreviaturas e Siglas

AASHTO – *American Association of State Highway and Transport Official (EUA)*

ASTM – *American Society of Testing Materials*

BAC – Betão Armado Contínuo

BBA – Betão Betuminoso com Alto Teor de Borracha

BBB – Betão Betuminoso com Baixo Teor de Borracha

BBD – Betão Betuminoso Denso

BBM – Betão Betuminoso com Médio Teor de Borracha

BBR – Betão Betuminoso Rugoso

BMB – Betume Modificado com Borracha

CETO-EP – Caderno de Encargos Tipo Obra, Estradas de Portugal

EENN – Estradas Nacionais

EVA – Acetato de Vinilo de Etileno

ISO – *International Organization for Standardization*

JAÉ – Junta Autónoma de Estrada

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MACOPAV – Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional

MBA-BMB – Mistura Betuminosa Aberta com Betume Modificado com Borracha

MBD – Mistura Betuminosa Descontínua

MBR – Micro Betão Rugoso

MBR-BMB – Mistura Betuminosa Rugosa com Betume Modificado com Borracha

NP – Norma Portuguesa

NR – *Natural Rubber*

OMS – Organização Mundial de Saúde

prEN – Pré-Norma Europeia

PRN – Plano Rodoviário Nacional

rpm – Rotações por Minuto

RTFOT – *Rolling Thin Film Oven Test* (processo de endurecimento/envelhecimento do betume asfáltico)

SAM - *Stress Absorbing Membrane*

SAMI – *Stress Absorbing Membrane Interlayer*

SBR – Estireno-Butadieno-Borracha

SBS – Estireno-Butadieno-Estireno

SGPU – Sistema de Integrado de Gestão de Pneus Usados

TFOT – *Thin-Film Oven Test* (processo de endurecimento/envelhecimento do betume asfáltico)

UV – Ultra-Violeta

Simbologia

cm - Centímetro

CBR – *Californian Bearing Ratio*

dB (A) - Decibéis

ϵ_t – Extensão Radial de Tracção

ϵ_z – Extensão Vertical de Compressão

ϵ_m – Módulo de Rigidez

g - Grama

kN – *KiloNewton*

kPa - *KiloPascal*

t – Tonelada

min - Minutos

mm – milímetro

mPa – Megapascal

P – Acção Vertical Uniformemente Aplicada

σ_t – Esforços de Tracção

σ_z – Esforços de Compressão

τ – Força Tangencial

s - Segundos

ΔT – Variação de Temperatura

°C – Grau Centígrado

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e Enquadramento do Tema

Um dos principais factores que contribuem para o desenvolvimento das civilizações, são as infra-estruturas rodoviárias. O povo Romano foi um dos grandes responsáveis pela evolução rodoviária, deixando uma vasta rede de estradas, designadas de Estradas Romanas e eram construídas com grandes pedras lisas e bermas delineadas (Vias Romanas, 2011).

A história da Europa fica marcada pelas estradas romanas que ainda hoje se conseguem encontrar e em relativas boas condições. Com o fim do Império Romano a rede de estradas evolui de forma natural, mas sem grande planeamento e com a construção de troços curtos, perdendo-se um pouco noção de rede de estradas, ou seja, os grandes trajectos que ligavam as principais cidades da península ibérica caíram em desuso, ficando toda a rede de estradas segmentada em rotas mais curtas (Vias Romanas, 2011).

Para uma boa organização e estruturação do território, as acessibilidades tornam-se um factor importante, daí em Portugal terem surgido importantes alterações ao nível das infra-estruturas rodoviárias.

As características das infra-estruturas de transportes terrestres tiveram avanços técnicos ao longo do tempo, sempre condicionados por factores económicos, políticos, sociais e geográficos. Com os avanços tecnológicos tentou-se, entre outros objectivos, minimizar os tempos de deslocação criando uma rede mais uniforme, melhorar o conforto da condução, aumentar a durabilidade dos pavimentos a fim de reduzir as intervenções de manutenção, melhorar as características relativas ao ruído e diminuir as deformações permanentes e fissuração. Para tais objectivos foram aplicadas e estudadas várias soluções para as diferentes camadas dos pavimentos, sendo a camada de desgaste a mais importante e a que reflecte o estado superficial do pavimento.

Com o objectivo de uniformizar o sistema rodoviário nacional foi criada em 1927 a Junta Autónoma de Estradas (JAE), implementando padrões modernos de circulação e melhorias ao nível da sinalização (Vias Romanas, 2011).

Com a crescente preocupação, principalmente a nível económico e ambiental, têm vindo a ser desenvolvidas várias técnicas de reabilitação de pavimentos. Uma das técnicas mais recentes em Portugal é a utilização de borracha proveniente de pneus usados na modificação dos betumes puros para utilização em misturas betuminosas.

Nos anos 60, entidades internacionais começaram a desenvolver novas formas de reabilitação de pavimentos, com a introdução de borracha reciclada de pneus usados nas misturas betuminosas. Ao longo dos anos confirmaram-se vários resultados positivos, quanto à utilização da borracha nas misturas betuminosas para camadas de desgaste.

A recuperação dos pneus usados, muitas vezes depositados em locais proibidos e de grandes riscos de incêndio ou contaminação, é importante visto resolver um problema de destino deste resíduo.

1.2. Objectivos

O presente trabalho pretende constituir um elemento resumo dos conhecimentos adquiridos em Portugal desde 1999, da aplicação de misturas betuminosas com betume modificado com borracha proveniente de pneus usados. Para um melhor conhecimento desta evolução, são analisados vários estudos de caracterização estrutural e funcional, sobretudo ensaios de resistência à fadiga, resistência às deformações permanentes, avaliação do ruído e sensibilidade à água.

Através do conhecimento dos resultados destes estudos é possível comparar as características dos pavimentos com betume modificado com borracha e os pavimentos convencionais, descrevendo-se assim as principais vantagens e desvantagens.

É também objectivo deste trabalho, uma análise económica da utilização dos pavimentos modificado com borracha comparativamente com as misturas convencionais.

1.3. Estrutura do Trabalho

A presente dissertação foi dividida em 5 capítulos. No primeiro capítulo fez-se um enquadramento do tema, resumindo a evolução dos pavimentos e a sua importância. Está presente também os objectivos principais desta dissertação.

No Capítulo 2 é feita, numa primeira fase, uma caracterização dos pavimentos rodoviários flexíveis onde são abordadas as qualidades funcionais e estruturais dos pavimentos, assim como a caracterização e comportamento das diferentes camadas constituintes. É também feita referência às características das misturas betuminosas em geral, fazendo-se uma descrição dos seus componentes, os betumes e os agregados. São identificados os principais métodos de formulação das misturas betuminosas, assim como as suas principais propriedades. Numa segunda fase é feito um resumo dos métodos de dimensionamento a nível mundial e posteriormente em Portugal. São ainda, neste capítulo, identificadas as principais patologias dos pavimentos rodoviários flexíveis, assim como as causas e problemas das mesmas.

No Capítulo 3 faz-se referência às misturas betuminosas com betume modificado com borracha. Primeiramente é descrito o modo de gestão de pneus usados em Portugal, assim como as suas propriedades, materiais constituintes e os processos de obtenção do granulado de borracha. De seguida introduz-se ao conceito de betume modificado com borracha. É feita referência aos principais métodos de fabrico das misturas com BMB e são descritas as principais propriedades e características dos betumes modificados de algumas entidades que os produzem.

No Capítulo 4 são descritos vários estudos realizados em Portugal de forma a perceber a evolução comportamento das características mecânicas e funcionais das misturas betuminosas modificadas com borracha.

No Capítulo 5, é feita uma análise aos resultados dos estudos referidos, assim como, uma análise económica/financeira, comparando os custos finais de obra com a aplicação de misturas betuminosas convencionais e misturas modificadas com betume-borracha. Por fim são descritas as vantagens e desvantagens da aplicação das misturas betuminosas modificadas com betume-borracha.

No Capítulo 6 é feita uma conclusão geral e propõe-se ideias para investigações futuras.

2. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS

2.1. Introdução

O transporte rodoviário é o principal meio de transporte utilizado em Portugal. A constante evolução e desenvolvimento do país fez com que ao longo dos anos a rede rodoviária nacional tenha vindo a sofrer uma reestruturação e ampliação. Para tal desenvolvimento, muito contribui a Junta Autónoma de Estradas (JAE) criada nos anos 30, hoje em dia Estradas de Portugal (EP).

Nos anos 80 desenvolveu-se um Plano Rodoviário Nacional (PRN 85) aprovado em 1985, actualmente Plano Rodoviário 2000 (PRN 2000) aprovado em 1998. Com a criação deste plano deu-se um grande aumento na extensão da rede construída.

Nas últimas décadas tem havido um aumento do volume de tráfego, exigindo por isso pavimentos mais resistentes. Daí ter-se verificado uma evolução ao nível da concepção de pavimentos, dos materiais utilizados, métodos de dimensionamento e soluções construtivas.

Os pavimentos flexíveis são os mais utilizados em Portugal. A sua constituição pode variar em função da intensidade de tráfego, resistência do solo de fundação e das características dos materiais que dependem por sua vez das condições climáticas. Por exemplo para tráfego pouco agressivo e dispondo de materiais granulares a custos favoráveis são projectados pavimentos onde é predominante a componente granular. Por outro lado quando o tráfego é agressivo, com impossibilidade de recorrer a materiais granulares de qualidade e face a uma fundação com reduzida capacidade de suporte são projectados pavimentos com várias camadas betuminosas (Branco *et al.*, 2008).

2.2. Caracterização dos pavimentos rodoviários flexíveis

O pavimento rodoviário tem como principal função assegurar uma superfície livre e regular que permita a circulação dos veículos em condições de segurança e comodidade. Com o fim de assegurar a sua função exige-se aos pavimentos dois tipos de qualidades, a funcional e a estrutural. A qualidade funcional está relacionada com os utentes, devendo ter em conta as três condições seguintes: de segurança, como a visibilidade dos condutores, projecção de água e resistência à derrapagem (atrito); de comodidade para os utentes e envolvente exterior, onde se incluem aspectos acústicos e vibrações; de economia, como tempos de viagem, consumo de combustíveis e desgaste dos veículos. Em relação à qualidade estrutural está relacionada com a capacidade de resistir às acções provocadas pelo tráfego (Freire *et al.*, 2004).

A constituição dos pavimentos rodoviários é feita através de várias camadas de diferentes espessuras finitas e materiais, como mostra a Fig. 2.1.

Ao longo do período de vida útil do pavimento são essencialmente dois tipos de solicitações que originam a degradação do mesmo, as solicitações devidas à acção do tráfego e as solicitações devidas à acção dos agentes climáticos, nomeadamente a acção da água e da temperatura.

A solicitação do tráfego define-se pela acção vertical repetida e uma acção tangencial entre o pneu e o pavimento. Devido à acção vertical, as várias camadas estão sujeitas a esforços de flexão que vão originar esforços de tracção e compressão. Ao longo das camadas “ligadas” (camadas betuminosas) existem esforços de tracção (σ_t) que vão provocar fendilhamento por fadiga, sendo o ponto crítico para efeitos de dimensionamento na base da última camada betuminosa. As camadas granulares resistem a esforços de compressão (σ_c) os quais provocam deformações permanentes, sendo o ponto crítico para dimensionamento de pavimentos na superfície do solo de fundação.

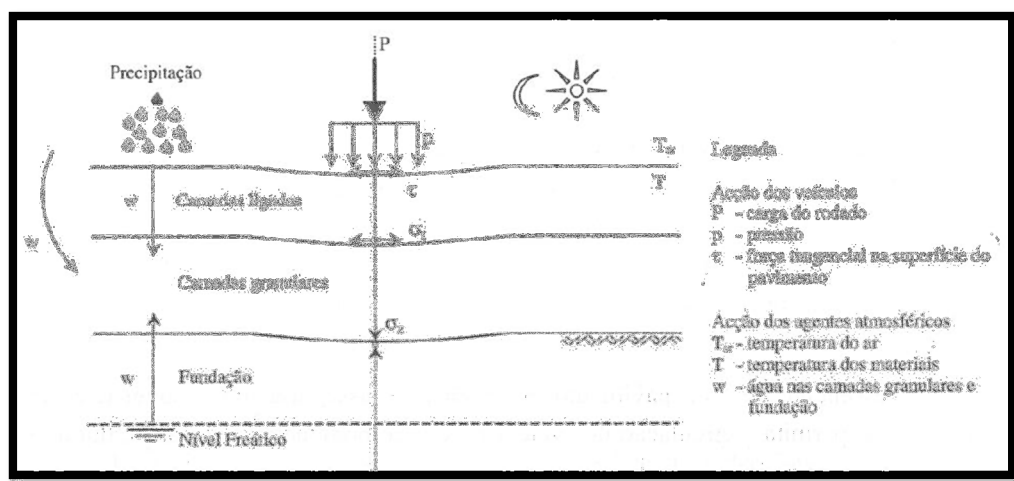


Figura 2. 1 - Pavimento Rodoviário: constituição e ações (Branco *et al.*, 2008)

A camada de desgaste (camada superficial) está sujeita a esforços tangenciais (τ), ações verticais (p) e de corte provocados pela solicitação do tráfego originando deformações permanentes. Esta camada está sujeita ainda a variações de temperaturas (Δt).

Estes dois fenómenos, fendilhamento por fadiga e deformações permanentes, são os principais factores para o pavimento atingir a ruína estrutural.

O Manual de Concepção de Pavimentos, também designado por MACOPAV, para a Rede Rodoviária Nacional da Junta Autónoma de Estradas, inclui diversos exemplos de pavimentos tipo para os diferentes pavimentos existentes, flexíveis, semi-rígidos e rígidos. Os grandes objectivos deste manual são, corresponder às exigências das diferentes classes de tráfego, garantir boas condições de fundação e melhorar a qualidade dos pavimentos a construir (MACOPAV, 1995).

Em Portugal a maioria dos pavimentos são do tipo flexível, razão pela qual esta dissertação abordará apenas esse tipo de pavimentos. A definição da sua constituição pode ser muito diversa em função, da intensidade do tráfego, da resistência do solo de fundação, das características dos materiais que por sua vez dependem das condições climáticas.

A estrutura apresentada na Fig. 2.2 para pavimentos flexíveis mostra o comportamento para camadas “coladas” e “descoladas” nas diferentes interfaces. Nos casos em que uma interface “colada” em fase de projecto passou a “descolada” podem ser dois os factores que contribuem para a evolução do fendilhamento do pavimento: por um lado as tensões máximas admitidas na face inferior da última camada betuminosa podem ser superiores às tensões admissíveis em projecto e, por outro lado a camada de desgaste pode estar submetida a esforços de tracção para os quais não foi concebida. No que diz respeito às camadas granulares e sabendo que não têm capacidade para resistir a esforços de tracção, verifica-se uma variação de esforços de compressão, que são máximos à superfície e diminuem com a profundidade atingindo o menor valor na face superior da fundação (Branco *et al.*, 2008).

A estrutura de um pavimento pode ter variações nas espessuras das camadas assim como nos materiais a empregar consoante a utilização, para tráfegos reduzidos ou intensos. Para tráfegos mais reduzidos são predominantes as camadas granulares ao contrário dos tráfegos intensos onde as camadas betuminosas têm maior significado sendo a sua espessura total significativa.

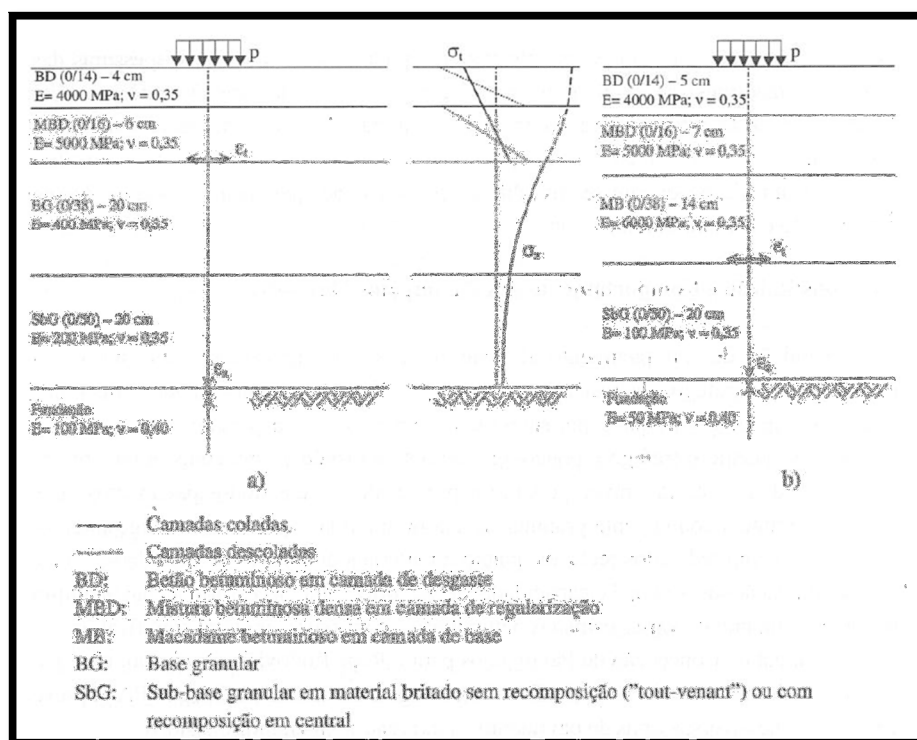


Figura 2. 2 - Comportamento e constituição do Pavimento Flexível (Branco *et al.*, 2008)

A **camada de desgaste** é a camada superficial do pavimento (revestimento) constituída por misturas betuminosas. Tem de apresentar uma superfície regular e uma boa aderência entre os pneus dos veículos e a própria superfície a fim de cumprir as qualidades funcionais já referidas. Em relação à sua contribuição para as qualidades estruturais deve, evitar o encaminhamento das águas para camadas inferiores e distribuir a tensões provocadas pelos rodados.

O **corpo do pavimento** tem a responsabilidade pela capacidade do pavimento em suportar as cargas provocadas pelo tráfego onde estão incluídas a camada de regularização, camada de base e camada de sub-base (Fontes, 2009).

- **Camada de Ligação** é a camada que se encontra abaixo da camada de desgaste tendo esta também de ter uma superfície regular para a correcta aplicação da camada de desgaste. Tem como função fazer a distribuição de tensões provocadas pelo tráfego. Esta camada pode ser antecedida de uma camada de regularização com o objectivo de definir o perfil necessário, podendo variar na sua espessura.

- **Camada de Base** é uma camada muito importante em termos estruturais pois tenta impedir que os esforços provocados pelo tráfego (pressões verticais) passem para camadas inferiores diminuindo assim as tensões de compressão na sub-base. Pode ser constituída por materiais granulares tratados com ligantes betuminosos ou não tratados e de boa qualidade pois, trata-se de uma camada normalmente com espessuras elevadas (Vicente, 2006). Podem ser também ser aplicadas misturas betuminosas ou betão pobre, dependendo das funções e características para a sua aplicação.

- **Camada Sub-Base** é a camada imediatamente sob a camada de base e apresenta grande parte das características da camada de base. Além dos materiais granulares podem ser constituídas por solos tratados ou seleccionados sendo todos eles apenas estabilizados mecanicamente por compactação.

Leito do pavimento é a camada de transição entre o solo de fundação e o corpo de pavimento. A construção desta camada está associada a trabalhos de terraplanagens (aterros e escavações). As principais funções são, aumentar a capacidade resistente da fundação, homogeneizar as características resistentes da fundação e protegê-la dos agentes climáticos. Pode ainda aumentar a

capacidade drenante, permitir a passagem de veículos de obra durante a fase de construção da estrada e possibilita a compactação das camadas sobrejacentes em boas condições. Quando os solos resultantes dos aterros ou escavações são de boa qualidade, eles próprios asseguram a função de leito de pavimento deixando de existir como camada individual. Os materiais mais frequentes utilizados no nosso país para esta camada são, materiais granulares não britados, solos seleccionados e solos tratados geralmente com misturas de cal ou cimento (Branco *et al.*, 2008)

Fundação é a última camada podendo ser esta de terreno natural ou aterro. A fundação é um dos factores importantes no dimensionamento de uma estrada havendo para tal diferentes classes de fundação como se verá no capítulo seguinte.

2.3. Características gerais das misturas betuminosas

O comportamento das misturas betuminosas depende da sua constituição, cujos componentes são os agregados e os ligantes betuminosos. Para conseguir os comportamentos desejados para essas misturas são estudadas as composições dos seus constituintes recorrendo a métodos de formulação para misturas betuminosas.

2.3.1. Materiais constituintes

2.3.1.1. Agregados

Os agregados são parte constituinte das misturas betuminosas e representam cerca de 75 a 85% do seu volume total (Silva, 2006).

Com base nas definições das Normas Europeias, agregado é o material granular utilizado na construção e pode ser natural, artificial ou reciclado. Um agregado natural é um agregado de origem mineral que foi sujeito apenas a processamento mecânico. O agregado artificial é um agregado de origem mineral resultante de um processamento industrial compreendendo modificações térmicas ou outras. Um agregado reciclado é um agregado resultante do processamento de materiais inorgânicos anteriormente utilizados na construção. (CETO-EP-14.03, 2012).

A presente norma portuguesa NP EN 13043: 2004 especifica as propriedades dos agregados para utilização em misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação. Os diversos tipos de ensaios que caracterizam os agregados têm como objectivo avaliar as suas propriedades. Para tal são avaliadas principalmente as características em relação à sua granulometria, resistência, forma e limpeza.

A granulometria é determinada através da peneiração do agregado seco através de uma série de peneiros com malhas de abertura progressivamente decrescente. As dimensões e percentagens a nível nacional regem-se segundo as normas portuguesas NP EN 933-1, NP EN 933-2. Com a percentagem de agregados retida em cada peneiro são elaboradas as curvas granulométricas para posterior análise. Estas curvas definem-se como a relação entre a percentagem de material passado em cada peneiro com o logaritmo da abertura do peneiro.

Os agregados em termos granulométricos podem classificar-se em, agregados grossos com diâmetros entre 2 mm a 45 mm, agregados finos com diâmetros a variar entre 0,063 mm e 2 mm e por último o fíler para valores de diâmetro inferiores a 0,063 mm (Freire *et al.*, 2004).

A resistência é outra importante característica a verificar nos agregados, devendo resistir ao choque, ao atrito entre as partículas e ao desgaste provocado pelo tráfego. O ensaio que caracteriza a resistência à fragmentação é o ensaio da máquina de *Los Angeles* (NP EN 1097-2: 2002) que consiste, na colocação do material juntamente com esferas de aço, dentro de um cilindro de aço, o

qual roda até fragmentar o material. Para verificar a resistência ao desgaste é elaborado o ensaio *Micro-Deval*, (NP EN 1097-1: 2002) onde a sua aplicação é essencialmente feita em agregados naturais ou artificiais. Este ensaio consiste na introdução de uma fracção de agregado no interior de quatro cilindros em aço inoxidável ociosos submetidos a uma rotação. Tanto no ensaio de *Los Angeles* como no de *Micro-Deval* considera-se o material, fragmentado e desgastado respectivamente, quando no fim do ensaio passam no peneiro com dimensão de 1,6 mm. É ainda em muitos casos exigido, quando os agregados se destinam à camada de desgaste, outro ensaio designado de Polimento Acelerado (NP EN 1097-8). Este ensaio consiste em quantificar a perda de rugosidade superficial devida à passagem dos rodados, ou seja, o grande objectivo com a realização deste ensaio é a manutenção do coeficiente de atrito após a aplicação da camada de desgaste.

A forma das partículas dos agregados não deverá ser alongada e lisa pois, são mais frágeis e reduzem a aderência com o ligante betuminoso, devendo ser sim de forma cúbica e rugosos sendo esta forma mais resistente e aderente. A forma das partículas caracteriza-se por vários índices como, o índice de achatamento (NP EN 933-3: 2002), o índice de forma (NP EN 933-4: 2002) e a percentagem de superfícies esmagadas (NP EN 933-5: 2002).

Por último os agregados devem estar limpos, não contendo impurezas como argilas, matérias de natureza orgânica, materiais que reajam com a água e excesso de finos. Tudo isto pode influenciar de forma negativa a ligação entre o agregado e o ligante. Dois ensaios podem ser realizados para fazer a medição da limpeza, o ensaio de determinação do Azul-de-metileno (NP EN 933-9: 2002) e o ensaio de Equivalente de Areia (NP EN 933-9: 2002). Ambos verificam a quantidade de material fino e argila presente nos agregados. Quando as quantidades destes materiais presentes nos agregados são superiores ao estipulado na norma serão rejeitados.

No quadro seguinte seguem os valores base das principais propriedades dos agregados para camadas de desgaste com misturas betuminosas a quente, de acordo com o Caderno de Encargos Tipo Obra de 2009 da, Estradas de Portugal, e com base na norma NP EN 13043:2004.

Quadro 2. 1 - Valores base das propriedades dos agregados para camadas de desgaste com misturas betuminosas a quente (CETO-EP – 14.03, 2012)

Propriedades	Normas	Unid.	Tipo de Mistura			
			AC 14 surf (BB)	AC 10 surf (mBBr)	AC 14 surf (BBr)	AC 14 surf (BB) incrustação de agregados duros
Forma do agregado grosso – Índice de achatamento	NP EN 933-3	-	FI_{20}	FI_{15}		FI_{20}
Percentagens de superfícies esmagadas e partidas nos agregados grossos	NP EN 933-5	%	$C_{100/0}$			
Resistência à fragmentação do agregado grosso, coeficiente <i>Los Angeles</i>	NP EN 1097-2 secção 5	%	LA_{20}			
Resistência ao desgaste por atrito do agregado grosso, coeficiente <i>micro-Deval</i>	NP EN 1097-1	%	M_{DE15}			
Resistência ao polimento do agregado grosso para camadas de desgaste	NP EN 1097-8	%	PSV_{50}			

2.3.1.2. Betumes

O betume asfáltico é habitualmente o ligante usado em trabalhos de pavimentação rodoviária. O betume é um aglutinante betuminoso obtido directamente do petróleo bruto através de processos de destilação directa. Contém em média 80 a 85% de carbono, 10 a 15% de hidrogénio, 2 a 3% de oxigénio e quantidades muito reduzidas de enxofre, azoto e metais.

O betume pode dividir-se em dois grandes grupos químicos, os asfaltenos (insolúveis em heptano normal) que constituem a fase descontínua do betume e, os maltenos (solúveis em heptano normal) que constituem a fase contínua (Fig. 2.3). Dentro dos maltenos pode ser feita a subdivisão em três grupos, os aromáticos, as resinas e os saturados.

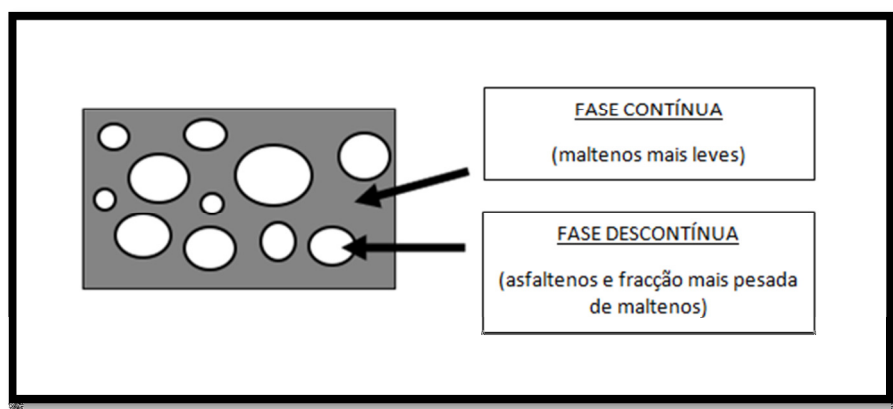


Figura 2. 3 - Subdivisão química do betume (Textos Científicos, 2008)

Cada um destes grupos torna-se importante para avaliar a composição, estrutura e reologia do betume. Os asfaltenos são sólidos amorfos, considerados materiais aromáticos, de cor preta ou castanha, de elevado peso molecular e constituem cerca de 5 a 25% do betume. As características reológicas do betume são afectadas precisamente por este tipo de materiais, quanto maior for a quantidade de asfaltenos mais duro é o betume.

Os aromáticos constituem a grande parte do betume, cerca de 40 a 65%. São líquidos viscosos, de cor castanha e têm o menor peso molecular de todos os grupos e são capazes de dissolver outras moléculas hidrocarbonadas de elevado peso molecular.

As resinas são sólidas ou semi-sólidas e apresentam cor, castanho-escuro. A principal característica destas resinas é a sua elevada polaridade o que as torna muito adesivas sendo mesmo a primeira fracção que adere aos agregados.

Os saturados são óleos viscosos de cor clara não polares. O seu peso molecular é predominantemente leve e representa cerca de 5 a 20% do betume asfáltico.

O betume é tradicionalmente considerado como um sistema coloidal constituído por micelas de asfaltenos de alta massa molecular dispersas ou dissolvidas num meio oleoso de baixa massa molecular, que são os maltenos (Whiteoak, (2003) citado em Fontes, (2009)).

Em Portugal os betumes de pavimentação, obtidos por processos de refinação do petróleo bruto, devem cumprir os requisitos da Norma Europeia NP EN 12591 Betumes e ligantes betuminosos – Especificações para betumes de pavimentação (EN 12591 *Bitumen and bituminous binders – Specifications for paving grade bitumens*), a qual especifica as propriedades e os respectivos métodos de ensaio adequados para a caracterização deste tipo de betumes. O quadro seguinte

apresenta as propriedades e os valores para os betumes 35/50 e 50/70 de acordo com o Caderno de Encargos da, Estradas de Portugal.

Quadro 2. 2 - Propriedades e métodos de ensaio dos betumes (CETO-EP – 14.03, 2012)

Propriedades		Normas	Unidade	Betume 35/50	Betume 50/70
Penetração, 25 °C		EN 1426: 2007	0,1 mm	35-50	50-70
Temperatura de Amolecimento – Método Anel e Bola		EN 1427: 2007	°C	50-58	46-54
Viscosidade Cinemática, 135 °C		NP EN 12595: 2009	mm ² /s	≥ 370	≥ 295
Solubilidade		NP EN 12592: 2009	%	≥ 99	
Temperatura de Inflamação em vaso aberto Cleveland		EN ISO 2592	°C	≥ 240	≥ 230
Teor em parafinas		EN 12606-2	% (m/m)	≤ 4,5	
Durabilidade, Resistência ao envelhecimento (RTFOT a 163°C, NP EN 12607-1)	Variação em massa(a) (Valor Absoluto)	NP EN 12607-1	%	≤ 0,5	
	Índice de Penetração (b)	EN12591 Anexo A	-	-1,5 - +0,7	
	Temperatura de fragilidade de Fraass (b)	EN 12593	°C	≤ -5	≤ -8
	Penetração retida	EN 1426	%	≥ 53	≥ 50
	Aumento da temperatura de amolecimento - severidade 2	EN 1427	°C	≤ 11	
(a) A variação de massa tanto pode ser positiva como negativa. (b) Esta propriedade está associada ao nível de severidade 2 da propriedade “Aumento da temperatura de amolecimento”, após envelhecimento com RTFOT.					

Das propriedades referidas no quadro 2.2, algumas são especialmente importantes para a caracterização dos betumes como, a penetração a 25 °C, a temperatura de amolecimento, a viscosidade cinemática e o ensaio de simulação de envelhecimento RTFOT.

O ensaio de penetração permite obter de forma indirecta a viscosidade dos betumes. Este ensaio consiste na medição da profundidade, numa amostra de betume, através da penetração de uma agulha com dimensões e peso segundo a respectiva norma à temperatura de 25 °C durante 5 segundos. Os valores obtidos representam os vários tipos de betume existentes, classificados segundo a especificação LNEC E-80 de 1997, entre 10/20 para betumes mais duros e 250/330 para betumes mais fluidos. Assim, como exemplo, um betume 35/50 é um betume em que a agulha penetra entre 3,5 mm (35 décimos) e 5 mm (50 décimos). Os betumes para pavimentação mais utilizados em Portugal são os betumes 35/50 e 50/70.

A temperatura de amolecimento determinada através do método do anel e bola permite classificar o betume para elevadas temperaturas. Este ensaio consiste na colocação em água de um provete de betume contida num anel, sendo essa água sujeita a um aquecimento (5 °C/min). Com o progressivo aquecimento o provete começa a deformar devido ao peso da esfera conduzindo ao seu

escoamento através do anel. Quando o betume e a esfera atingem a altura de 2,5 cm regista-se a temperatura da água. O ponto de amolecimento anel e bola é dado pela média dos dois provetes que são usados no ensaio.

A viscosidade cinemática é a razão entre a viscosidade dinâmica e a massa volúmica de um líquido, à temperatura de determinação da viscosidade. O ensaio consiste em determinar o tempo de escoamento de um determinado volume de líquido através do capilar de um viscosímetro de vidro calibrado a determinada temperatura, rigorosamente controlada (tempo de escoamento). A viscosidade cinemática é calculada multiplicando o tempo de escoamento em segundos pelo factor de calibração do viscosímetro.

O ensaio pelo método de RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*), ou seja, Ensaio de Película Fina Rotativa em Estufa, é especificado pela Norma Portuguesa NP EN 12607-1: 2009 e tem como objectivo produzir o endurecimento do betume através do efeito combinado de calor e ar numa película fina móvel de betume ou ligante betuminoso, simulando o envelhecimento que um ligante betuminoso sofre durante a mistura numa instalação de fabrico de misturas betuminosas.

A medição da temperatura de inflamação em vaso aberto de Cleveland é importante para garantir a segurança na produção das misturas betuminosas a elevadas temperaturas, pois o betume quando aquecido liberta fumos que são inflamáveis. Neste ensaio é colocada uma determinada quantidade de betume num recipiente que é aquecido progressivamente e, faz-se passar uma chama sobre o betume. A temperatura à qual o betume provoca chama é o ponto de inflamação. (Silva, 2006)

Uma das grandezas para melhor conhecer o comportamento dos betumes a baixas temperaturas é o ponto de fragilidade ou de rotura (ponto de *Fraass*). Este ensaio tem por objectivo determinar a temperatura mínima à qual o betume fendilha. Em Portugal este ensaio não tem sido utilizado, mas brevemente e pela sua importância para o estudo dos betumes modificados com polímeros será um ensaio a ter em conta.

A permanente investigação do comportamento mecânico das misturas betuminosas, faz com que se venha a utilizar outros tipos de betumes de forma a otimizar esse comportamento, como por exemplo, os betumes modificados. Esta modificação pode ser feita com a adição de polímeros (elastómeros, termoplásticos e termoendurecíveis), anti-oxidantes, enxofre, entre outros.

Os elastómeros ou borrachas (são exemplo todos os tipos de borracha) são polímeros lineares submetidos a um processo de vulcanização apresentando propriedades elásticas. Em Portugal a introdução de elastómeros nos betumes mais usada é o estireno-butadieno-estireno – SBS, sendo este um polímero não submetido a vulcanização. O grupo dos termoplásticos (por exemplo o etileno-acetato de vinilo – EVA) trata-se de polímeros solúveis em dissolventes orgânicos, que amolecem por acção do calor. Ao arrefecer, podem ser moldados conservando a maior parte das suas propriedades intrínsecas. Por fim os polímeros termoendurecíveis são formados por reacção química de dois componentes, a base e o endurecedor, que dão lugar a uma estrutura que se torna insolúvel e indivisível. As resinas são um exemplo deste tipo de polímeros. (Probigalp, 2011)

A adição de polímeros aos betumes provoca, de um modo geral, uma melhoria das propriedades de um betume convencional como, menor susceptibilidade térmica, maior intervalo de plasticidade, maior coesão, melhor resposta elástica, melhor resistência à acção da água e maior resistência ao envelhecimento.

Mais recentemente e como alternativa aos termoplásticos e elastómeros tem vindo a ser utilizada a modificação do betume com granulado de borracha proveniente de pneus em fim de vida útil.

2.3.2. Formulação e propriedades das misturas betuminosas

Os métodos de formulação para misturas betuminosas a quente dividem-se em cinco grupos: tipo “receita”, empíricos, analíticos, volumétricos e racionais.

Os métodos tipo “receita” são baseados na longa experiência de resultados obtidos para materiais de características similares, ou seja, a composição da mistura betuminosa é conhecida. A uniformização dos procedimentos experimentais origina um grande conhecimento da produção e torna-se a principal vantagem destes métodos. A grande desvantagem é não permitir a inovação ou adaptação a outro tipo de procedimentos.

No que diz respeito aos métodos analíticos utilizam várias relações volumétricas para os agregados e ligante de forma a chegar a uma composição final exclusivamente matemática (Branco *et al.*, 2008). A principal vantagem deste método é de permitir obter uma composição base das misturas sem recorrer à produção de provetes. Apesar de a composição base ser obtida através de fórmulas matemáticas é aconselhável verificar experimentalmente para que essa mesma composição seja considerada como resultado final (Silva, 2006).

Os métodos volumétricos caracterizam-se por indicarem as proporções volumétricas dos vazios, da percentagem de betume e dos agregados de misturas betuminosas compactadas. A composição da mistura betuminosa é obtida através das propriedades volumétricas (volume de vazios dos agregados, volume de vazios na mistura betuminosa e volume de vazios preenchidos por betume) medidas em provetes compactados em laboratório semelhantes às misturas betuminosas “*in situ*”, visto o equipamento de compactação laboratorial reproduzir adequadamente a compactação “*in situ*”. Estes métodos adequam-se apenas a estradas com tráfego reduzido (Silva, 2006).

Os métodos empíricos são geralmente os mais utilizados para a formulação das misturas betuminosas. Presentemente a versão portuguesa da Norma Europeia EN 13108-1: 2011 – *Bituminous Mixtures, Material Specifications - Part 1: Asphalt Concrete* define os requisitos das misturas do grupo betão betuminoso destinado a estradas aeroportos e outras áreas de circulação. Nesta norma são referenciados dois tipos de abordagem, a empírica e a fundamental. Visto, as diferenças de conhecimento e experiência na comunidade europeia relativamente às especificações baseadas numa abordagem fundamental opta-se por numa primeira fase, para os países com menos experiência, a abordagem empírica e posteriormente com a experiência adquirida passar para a abordagem fundamental. Portugal está incluído neste grupo, prevendo-se que adquira brevemente a experiência na abordagem fundamental.

A abordagem empírica define as misturas betuminosas em termos de parâmetros de composição e requisitos para os materiais constituintes, combinados com requisitos adicionais baseados em ensaios relacionados como desempenho (NP EN 13108-1, 2011).

Dentro da abordagem empírica está incluído o método de Marshall (norma ASTM D 1559) com origem nos anos 40 por intermédio de Bruce Marshall. Em Portugal começou a ser utilizado no início dos anos 50, sendo ainda hoje o mais utilizado (Norma Portuguesa NP 142, actualmente NP EN 13108-1: 2011), o qual se descreve a seguir sucintamente.

O grande objectivo deste método é a determinação da percentagem óptima de betume através das diferentes propriedades que caracterizam as misturas betuminosas. Entre as principais estão a estabilidade, a deformação, a baridade, a porosidade e volume de vazios no agregado.

Para tal são fabricados provetes cilíndricos da mistura a estudar que são sujeitos primeiro, aos ensaios não destrutivos, ou seja, são pesados e medidos para determinação da baridade máxima teórica e baridade aparente da mistura compactada, a porosidade e o volume de vazios na mistura dos agregados. As restantes características, estabilidade e deformação são obtidas com ensaios destrutivos, determinadas através do ensaio de compressão de Marshall (Fig. 2.4).

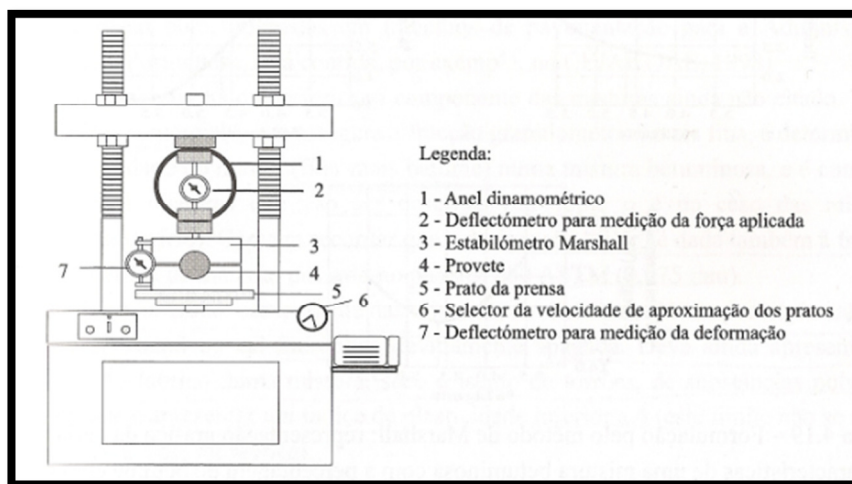


Figura 2. 4 - Esquema do ensaio de compressão de Marshall (Branco *et al.*, 2008)

Todas estas características são relacionadas com a percentagem de betume com que foram fabricados os provetes Marshall. A percentagem óptima de betume para a mistura em questão será a média das percentagens correspondentes à máxima estabilidade, à máxima baridade e ao valor médio dos limites de porosidade.

Na formulação das misturas betuminosas em Portugal, para além do cálculo da percentagem óptima de betume para as misturas através do Método de Marshall, recomenda-se a realização de ensaios de pista (*Wheel-Tracking* – EN 2697-22) e sensibilidade à água (EN 12697-30) sobre três misturas betuminosas, uma com percentagem óptima de betume, outra com + 0,5% relativamente à percentagem óptima e outra com – 0,5% relativamente à percentagem óptima.

No quadro 2.3 são apresentadas as misturas betuminosas e as suas designações actuais segundo o Caderno de Encargos da, Estradas de Portugal.

Os métodos racionais ou fundamentais traduzem-se no fabrico de provetes com certas relações volumétricas, sendo estes sujeitos a ensaios para determinação de características mecânicas como a rigidez, resistência à fadiga e resistência às deformações permanentes. A principal vantagem é a possibilidade de verificar o comportamento de diversos materiais para diferentes condições de utilização. A grande desvantagem é o custo e a morosidade destes ensaios para determinar as características referidas.

As características mecânicas das misturas betuminosas dependem de vários factores, como por exemplo, a composição volumétrica, o tipo de betume, as condições de temperatura e a velocidade de circulação (aplicação de cargas).

2.3.2.1. Resistência à fadiga

O fendilhamento é uma das principais causas de rotura de um pavimento e caracteriza-se pela abertura de fendas à superfície do mesmo, traduzindo-se num sinal de perda de qualidade estrutural dos pavimentos. A passagem repetida de veículos e as variações de temperatura são as principais causas para este fenómeno. Normalmente estas fendas iniciam-se na superfície inferior da camada betuminosa e propagam-se até á superfície do pavimento.

Quadro 2. 3 – Designação de misturas betuminosas consoante camada (CETO-EP – 14.03, 2012)

Camada	Designação anterior	Designação actual
Base	Macadame Betuminoso Fuso B	AC 32 base ligante (MB)
	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 base ligante (MB)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 20 base ligante (MBAM)
Ligação	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 bin ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 bin ligante (MBD)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 16 bin ligante (MBAM)
	Betão Betuminoso	AC 14 bin ligante (BB)
	Argamassa Betuminosa c/ betume modificado	AC 4 bin ligante (AB)
Regularização	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 reg ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 reg ligante (MBD)
	Betão Betuminoso	AC 14 reg ligante (BB)
	Argamassa Betuminosa c/ betume modificado	AC 4 reg ligante (AB)
	Betão Betuminoso	AC 14 surf ligante (BB)
	Betão Betuminoso Rugoso	AC 14 surf ligante (BBR)
	(Micro) Betão Betuminoso Rugoso	AC 10 surf ligante (mBBR)

A resistência à fadiga de uma mistura betuminosa é geralmente expressa como uma relação entre a tensão ou extensão inicial e o número de repetições de carga que produzem a ruína. Este número é habitualmente determinado usando ensaios de flexão repetida, tracção directa ou ensaios diametrais realizados a determinados níveis de tensão ou extensão. As principais formas de carregamento utilizadas em ensaios de fadiga são a sinusoidal, pulsatório e cíclica (Pais, (1999) citado em Fontes, (2009)).

Entre os vários ensaios, actualmente o mais utilizado e que apresenta mais vantagens é o ensaio de flexão a vigas simplesmente apoiadas sujeitas a um carregamento em quatro pontos, dois de apoio (reação) e dois de carregamento central (acções). Este tipo de ensaio simula o aparecimento do fendilhamento por fadiga devido à deformação de tracção que se desenvolve na face inferior das camadas betuminosas. A Fig. 2.5, mostra o esquema representativo deste ensaio.

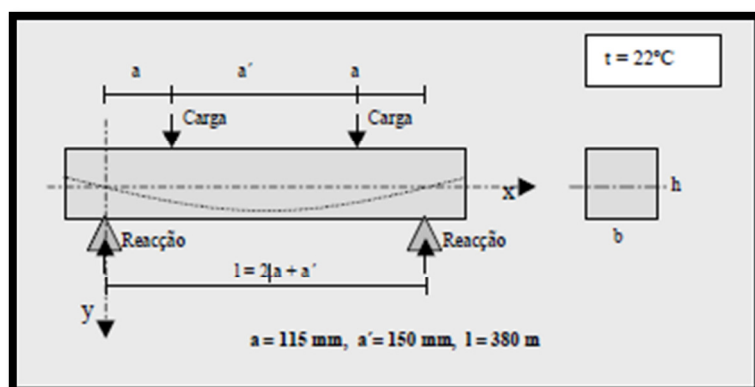


Figura 2. 5 - Exemplo do esquema de ensaio à flexão simples em 4 pontos (Sousa *et al.*, 2004)

A norma americana AASHTO TP8/94 e a Norma Europeia EN 12697-24: 2004, descrevem os procedimentos necessários para a realização destes ensaios de resistência à fadiga. O quadro seguinte mostra as principais diferenças entre elas.

Quadro 2. 4 - Comparação entre as normas AASHTO TP8-94 e EN 12697-24: 2004

Comparação		Norma Americana AASHTO TP8-94	Norma Europeia EN 12697-24: 2004
Provetes Prismáticos	Dimensões (mm)	380x50x63	Função da dimensão máxima do agregado utilizado nas misturas betuminosas
	Nº de Provetes	3 (mínimo)	18 (mínimo)
Condições e técnica de ensaio	Ciclos de carga inicial	50	100
	Frequência	Variação de 5 a 10 Hz	Variação de 0 a 60 Hz
	Temperatura de ensaio	20 °C	Variação de 0 a 20 °C

2.3.2.2. Módulo de deformabilidade

O módulo de deformabilidade das misturas betuminosas depende sobretudo da temperatura e da velocidade de circulação. Quando o seu comportamento é essencialmente elástico, depende da rigidez elástica do betume e da composição volumétrica da mistura betuminosa. O conhecimento do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas é importante para determinação da capacidade resistente dos pavimentos, bem como para a análise da resposta do pavimento às cargas dos veículos (Silva, 2006). Na Fig. 2.6 é apresentado um ábaco, o qual relaciona a rigidez do betume e a percentagem volumétrica de betume e dos agregados com o fim de calcular o módulo de deformabilidade das misturas betuminosas.

O módulo de deformabilidade é definido como a relação entre as amplitudes das tensões aplicadas e das deformações medidas. O ângulo de fase é uma medida do desfasamento entre essas tensões e deformações, permitindo apurar se o comportamento da mistura betuminosa é predominantemente elástico (ângulo de fase nulo) ou viscoso (ângulo de fase próximo de 90°C).

Na prática do dimensionamento estrutural dos pavimentos é corrente adoptar para as misturas betuminosas o comportamento elástico linear, mas, caracterizado por módulos de deformabilidade e coeficientes de *Poisson* variáveis em função, sobretudo, da temperatura e da frequência de aplicação das cargas. A determinação do módulo de deformabilidade e do coeficiente de *Poisson* pode ser feita em ensaios laboratoriais com carregamentos sinusoidais repetidos, realizados a temperatura controlada em provetes prismáticos, trapezoidais ou cilíndricos, quer fabricados em laboratório, quer extraídos das camadas dos pavimentos. Do ponto de vista da solicitação de ensaio, os provetes podem ser submetidos à flexão simples, à tracção indirecta em compressão diametral ou à tracção directa uniaxial (Neves & Correia, 2006).

O módulo de deformabilidade pode apresentar valores muito variáveis podendo ir de 3000 MPa a 8000 MPa, consoante as misturas betuminosas em causa. De acordo com o MACOPAV (1995) é considerado o valor de 4000 MPa para o dimensionamento dos pavimentos.

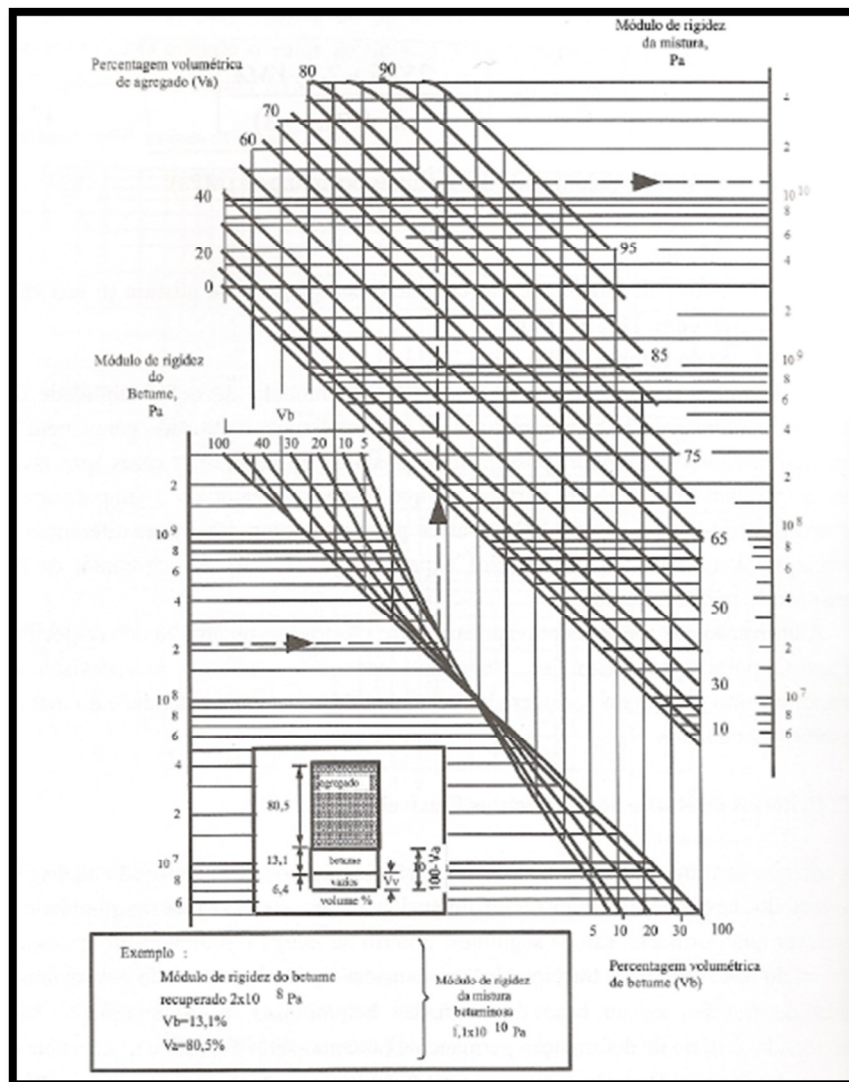


Figura 2.6 - Ábaco de previsão do módulo de deformabilidade segundo manual de dimensionamento da SHELL (Picado Santos, (1995) citado em Branco *et al.*, (2008))

2.3.2.3. Deformações permanentes

As deformações permanentes das misturas betuminosas estão associadas a alguns factores entre os quais o crescimento do volume de veículos pesados e as temperaturas elevadas no Verão que proporcionam o aparecimento desta anomalia. A formação de rodeiras à superfície dos pavimentos flexíveis é actualmente um dos principais mecanismos de ruína.

O comportamento às deformações permanentes ganha assim importância quer na formulação quer no dimensionamento de pavimentos sujeitos a tráfegos intensos e a condições climáticas adversas. Alguns dos ensaios que permitem a caracterização do comportamento das misturas betuminosas relativamente à resistência às deformações permanentes são:

- Ensaios de compressão triaxial, com aplicação de cargas estáticas ou repetidas;
- Ensaios de compressão simples, com aplicação de cargas estáticas ou repetidas;
- Ensaios de cargas rolantes repetidas sobre lajes de misturas betuminosas (*wheel-tracking*);

- Ensaios de corte, aplicação de cargas estáticas ou repetidas.

Habitualmente em Portugal é usado o ensaio de pista em laboratório (*wheel-tracking*) segundo a norma de ensaio espanhola NLT 173/84 – *Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensaio de laboratorio*. Este ensaio consiste no deslocamento contínuo, de uma roda de borracha especial, ao longo de uma linha para trás e para a frente sobre as lajetas, retiradas da obra e moldadas em laboratório, para comparação.

Para além desta norma espanhola surgiu a Norma Europeia EN 12697-22: 2005. Esta norma compreende a utilização de 3 equipamentos de ensaio para a avaliação do comportamento às deformações permanentes de misturas betuminosas, em geral, os equipamentos de pequenas, grandes (Fig. 2.7) e muito grandes dimensões. O quadro 2.5 mostra as diferenças entre estes três equipamentos.



Figura 2. 7 – Equipamentos de pequenas dimensões (esq.) e de grandes dimensões (dir.) (LNEC_A, 2012)

O objectivo do ensaio de pista é idêntico para as duas normas, contudo existem algumas diferenças. De acordo com a norma espanhola o valor da temperatura de ensaio é fixo contrariamente ao estabelecido na norma europeia.

O equipamento utilizado na norma espanhola NLT 173/84 é adequado para a realização de ensaios com equipamentos de pequenas dimensões de acordo com a EN 12697-22, desde que sejam efectuadas modificações na carga aplicada e na frequência de carregamento (Antunes, 2006).

A norma Espanhola NLT 173/84 prevê um valor limite para a velocidade de deformação de 15×10^{-6} mm/min.

A avaliação das deformações permanentes pode ainda ser feita através do ensaio de corte a altura constante. As deformações por corte ocorrem após a densificação total dos materiais e ocorrem sem alteração do volume material. Este ensaio de corte a altura constante é realizado de acordo com a norma americana AASHTO TP7-01 e baseia-se em três expressões, a lei de variação da extensão plástica (2.1) e as equações para cálculo da resistência às deformações permanentes (2.2, 2.3).

$$EPC = a \times \text{Ciclo}^b \quad (2.1)$$

$$\text{Profundidade de rodeira (mm)} = 294 \times \text{Extensão plástica de corte} \quad (2.2)$$

$$\text{Log (ciclos)} = -4,36 + 1,24 \times \log (\text{eixos de 80 kN}) \quad (2.3)$$

Quadro 2. 5 - Comparação dos três equipamentos utilizados na EN 12697-22: 2005 (Antunes & Freire, 2006)

EN 12697-22: 2005		Equipamento de grandes dimensões	Equipamento de muito grandes dimensões	Equipamento de pequenas dimensões
Equipamento de Ensaio		Roda Pneumática com (80±5)mm de largura Pressão (600±30)KPa Percurso=(410±5)mm Frequência=(1,0±0,1)Hz	Roda Pneumática com (110±5)mm de largura Pressão(10000±100)KPa Percurso=(700±5)mm Frequência=(2,5±0,5)s	Roda de borracha maciça com (w=50±5) mm de largura Espessura=(20±2)mm Dureza 80IRHD Carga na roda: [(700+w/50) ±10]JN
Provete	Dimensões	Camadas com h ≤ 50mm: Prismáticos (500x180x50)mm Camadas com h ≥ 50mm: Prismáticos (500x180x100)mm	Prismáticos (700x500x60)mm	Prismáticos com (260x300): h = 25, 40, 60 ou 80 mm, função de D. Cilindricos com φ 300 mm
	Preparação dos provetes	- Laboratorial: Roller-Compactador (EN 12697-33) Vibro-Compressão (EN 12697-32) - In Situ: Extraídos do pavimento (EN 12697-27)		
	Condicionamento	Mínimo de 2 dias após compactação a T ≤ 25°C Aplicação de 1000 ciclos à temperatura de 15 a 25 °C Condicionamento à temperatura de ensaio durante 12h a 16h	Mínimo de 2 dias após compactação a T ≤ 25°C Colocação de provete à temperatura de ensaio durante 14h a 18h	Mínimo de 2 dias após compactação a T ≤ 25°C Colocação de provete à temperatura de ensaio durante 4h a 24h, função da espessura do provete Aplicação de 5 ciclos de carga
Ensaio	Temperatura	Não fixada;	Não fixada;	Não fixada;
	Leitura das deformações	Leitura de referência em 15 pontos da secção no início do ensaio; e aos 1000, 3000, 10000 e 30000 ciclos	Leitura de referência em 3 pontos da secção no início do ensaio e aos 100, 200, 500, 1000, 2000, 3000 até aos 30000 ciclos	Método A: Cada 25 ciclos até aos 1000 ciclos, ou seja, atingida a rotura (15mm de cavado); Método B: 6 a 7 leituras na primeira hora e posteriormente 1 leitura cada 500 ciclos, até 10000 ciclos.

2.3.2.4. Ruído

Para além das características mecânicas existem também as funcionais. O aumento das vias de circulação e consequentemente o tráfego rodoviário resulta num aumento do nível de ruído sendo uma das características funcionais a ter em conta. Este problema agrava-se quando o nível de ruído se localiza perto de zonas habitacionais e com grande densidade populacional. Posto isto, desenvolveram-se várias acções de forma a melhorar o conforto e a própria qualidade ambiental dos pavimentos rodoviários. Foram publicadas duas directivas do Parlamento Europeu e do Conselho: a Directiva 200/49/CE, de 25 de Junho, relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente;

a Directiva 2001/43/CE, de 27 de Junho, relativa aos pneumáticos dos veículos a motor e seus reboques bem como à respectiva instalação nesses veículos.

São várias as fontes associadas ao ruído nos pavimentos como, o ruído do motor, o sistema de exaustão e principalmente, a interacção pneu/pavimento. O conhecimento profundo desta interacção é importante para ajudar na formulação das misturas betuminosas com o objectivo de melhorias acústicas. Propriedades como a textura superficial e a porosidade da camada são fundamentais para a determinação das características acústicas. Estas propriedades são geralmente avaliadas através de dois métodos, o método Estatístico de Passagem (ISO 11819-1: 1997) ou o método da Estrita Proximidade (ISO/CD 11819-2: 1997), sendo o primeiro o mais utilizado.

De acordo com a normalização ISO 11819-1, 1997 – “*Acoustics - Measurement of influence of road surfaces on traffic noise*” as medições deste tipo devem ser realizadas através de sonómetros a uma distância de 7,5 m do eixo da via. Na Fig. 2.8, tem-se um exemplo de um sonómetro.



Figura 2. 8 - Sonómetro (Ruivo_A, 2004)

O Regulamento Geral sobre o Ruído (RGR - Decreto-Lei nº 9/2007) define os limites de nível sonoro contínuo, para zonas designadas de sensíveis ou mistas. As zonas sensíveis são áreas definidas como vocacionadas para usos habitacionais, escolas, hospitais, espaços de recreio e lazer e outros equipamentos colectivos, prioritariamente utilizados pelas populações como locais de recolhimento. As zonas mistas são áreas com ocupação semelhante às zonas sensíveis, no entanto, também afectas a actividades de comércio e serviços.

Segundo RGR, as zonas mistas não devem ficar expostas a ruído ambiente exterior superior a 65 dB(A) no período diurno, expresso pelo indicador L_{den} , e superior a 55 dB(A) no período nocturno, expresso pelo indicador L_n . As zonas sensíveis não devem ficar expostas a ruído ambiente exterior superior a 55 dB(A) no período diurno, expresso pelo indicador L_{den} , e superior a 45 dB(A), no período nocturno, expresso pelo indicador L_n ;

2.3.2.5. Aderência

As características das misturas betuminosas que afectam a aderência são a microtextura e macrotextura (Fontes, 2009). A microtextura corresponde ao domínio de comprimento de onda até 0,4 mm (Azevedo, 2011) podendo ser avaliada indirectamente através da medição do coeficiente de atrito. A microtextura é função das propriedades das partículas dos agregados e é principalmente significativa a baixas velocidades. A macrotextura de uma camada de desgaste corresponde ao domínio de comprimento de onda compreendido entre 0,5 mm e 50 mm (Azevedo, 2011), e resulta

das partículas maiores do agregado na mistura, sendo importante para determinação do coeficiente de atrito para altas velocidades. Para avaliação da macrotextura podem ser utilizados dois métodos, o método da mancha de areia que é utilizado para a determinação da profundidade média da textura da superfície da camada de desgaste sendo feito segundo a norma europeia EN 13036-1 (2001) e o método mediante laser, seguindo a norma NP ISO 13473-1. De acordo com o CETO-EP – 15.03, 2009, segue-se a norma NP ISO 13473-1 para caracterização final de um pavimento relativamente à macrotextura. No quadro seguinte são apresentados os valores mínimos para as camadas de desgaste salientadas no Caderno de Encargos.

Quadro 2. 6 - Valores mínimos de profundidade média de textura superficial em camadas de desgaste (CETO-EP – 15.03, 2009)

Requisitos/Propriedades	Unidade	Utilização					
		AC10 surf (mBBR)	AC14surf (BB)	AC14surf (BB)	PA 12,5 (BBd)	MBR-BBA MBR-BBM	MBA-BBA MBA-BBM
Especificidades de utilização		Valores de MPD por trechos de 100 metros					
MPD - profundidade média do perfil	mm	≥ 1,0	≥ 1,0	≥ 0,63	≥ 1,25	≥ 1,0	≥ 1,13

A medição da resistência ao atrito, pode ser dividida em três tipos: a medição pontual, que é feita sem utilização do pneu, sendo o método de medição mais usual o Pêndulo Britânico; a medição longitudinal em contínuo é realizada com o pneu bloqueado, ou seja, são usados reboques traccionados a elevada velocidade, com bloqueamento da roda do reboque durante alguns instantes, medindo assim a aptidão dos pavimentos à travagem. Esta medição tem especial interesse sobretudo em aeroportos; por fim a medição transversal em contínuo, que é a mais relevante para os pavimentos rodoviários. Para esta medição são utilizados equipamentos com pneus que fazem um determinado ângulo com a direcção do deslocamento do veículo de ensaio (Branco, 2008). Esta medição serve para avaliar a segurança de circulação em curva.

Geralmente a avaliação da resistência ao atrito é feita com recurso a dois equipamentos, o *Grip-Tester* (Fig. 2.9) e o *SCRIM* (*Sideway Force Coefficient Routine Investigation Machine*). Os valores do ensaio *Grip-Tester* são corrigidos para os valores de ensaio *SCRIM*, segundo a expressão $0,89 \times \text{Grip Number}$ (Fonseca, 2006).

De acordo com o CETO-EP – 15.03 (2009), a medição do coeficiente de atrito deve ser efectuada em contínuo, com piso molhado, ao longo da rodeira externa de cada uma das vias construídas. Esta medição deve ser realizada a uma velocidade de 50 km/h. Estes equipamentos (*SCRIM* e *Grip Tester*) devem ser munidos de sistema de rega automática, de forma a garantir uma película de água com 0,5 mm de espessura sobre a superfície ensaiada.



Figura 2. 9 - Exemplo de ensaio *Grip-Tester* (LNEC, 2011)

2.3.2.6. Sensibilidade à Água

Outra característica importante é a permeabilidade à água. A água pode interferir de uma forma geral através de dois tipos de degradação: primeiro a perda de adesividade entre o betume e o agregado e em segundo a perda de coesão e resistência do betume. A sensibilidade à água é uma propriedade das misturas betuminosas que é habitualmente avaliada na sua formulação, e para a qual são estabelecidos valores mínimos a cumprir nos Cadernos de Encargos de acordo com o método de ensaio utilizado para a sua avaliação.

A avaliação desta propriedade é tradicionalmente feita, em Portugal, através da Norma Americana MIL – STD – 620A que determina o cálculo Índice de Resistência Conservada (IRC) em ensaios *Marshall*. Posteriormente e com o aparecimento das normas europeias, surgiu a norma EN 12697-12: (2003) que prevê o cálculo da resistência conservada em ensaios de tracção indirecta. O facto de Portugal ainda não ter experiência com a resistência conservada em ensaios de tracção indirecta, a norma NP EN 13108-1 – Misturas Betuminosas – Especificações dos materiais: Parte 1 – Betão Betuminoso, recomenda a determinação da resistência conservada através da norma americana.

O método baseado na norma MIL – STD – 620A, assenta na comparação entre forças de rotura *Marshall* de dois grupos de provetes acondicionados de forma distinta. Para tal é fabricada uma mistura betuminosa com a composição declarada e são compactados 6 provetes subdivididos em dois grupos de 3. O primeiro grupo de provetes é imerso em água a 60°C durante 30 minutos, sendo de seguida determinada a força de rotura de cada provete através do ensaio *Marshall* e calculado o respectivo valor médio (F1).

O segundo grupo foi acondicionado durante 24 horas num banho de água a 60°C, após o que é determinado o valor médio das respectivas formas de rotura *Marshall* (F2).

Com base nos resultados obtidos para as forças de rotura médias, calcula-se o Índice de Resistência Conservada (IRC).

$$IRC_{\text{Marshall}} = \frac{F2}{F1} \times 100\% \quad (2.4)$$

2.4. Dimensionamento das estruturas de pavimentos

O primeiro grande ensaio rodoviário à escala natural foi realizado em 1920 em Illinois, nos Estados Unidos da América do Norte. Um dos métodos mais conhecidos de dimensionamento, e usado quase até aos nossos dias, foi o método CBR (*California Bearing Ratio*). Este método foi desenvolvido por Porter e tinha como objectivo fornecer a espessura do pavimento em função do

índice CBR do solo de fundação, índice este que é o cociente entre a força necessária para obter uma penetração fixa (2,5 mm ou 5 mm) no provete e a força determinada num material padrão (macadame hidráulico) nas mesmas condições de ensaio, sendo o resultado expresso em percentagem (Yoder, *et al.* (1975), citado em Branco *et al.* (2008)).

Ao longo dos anos os métodos de dimensionamento foram evoluindo e encontraram-se modelos de dimensionamento que avaliavam o comportamento dos materiais e do pavimento em conjunto denominados métodos empírico-mecanicistas. Dois dos métodos mais conhecidos e usados por grande parte dos países mais desenvolvidos, assentes nas bases empírico-mecanicistas são, o método da Shell e o método da Universidade de Nottingham. Ambos definem expressões de dimensionamento das misturas betuminosas e também expressões que definem os critérios de ruína dos pavimentos, como: critério de fadiga (expressões 2.5 e 2.6) controlado pela extensão radial de tracção (ϵ_t) na base das camadas betuminosas; critério de deformação permanente (expressões 2.7 e 2.8), controlado pela extensão vertical de compressão (ϵ_z) no topo do solo de fundação. Definem também uma expressão para o módulo de rigidez (E_m) das misturas betuminosas.

Shell

$$\epsilon_t = (0,856 \times V_b + 1,08) \times E_m^{-0,36} \times N^{-0,2} \quad (2.5)$$

ϵ_t - Extensão de tracção (adimensional)

N - nº de repetições de carga para determinado eixo padrão (em milhões – $\times 10^6$)

V_b - percentagem volumétrica de betume no volume total (%)

E_m - módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (Pa)

$$\epsilon_{dp} = K_s \times N^{-0,25} \quad (2.6)$$

ϵ_{dp} - Extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação (adimensional)

N - nº de repetições de carga para determinado eixo padrão (em milhões – $\times 10^6$)

K_s – parâmetro que depende da probabilidade de sobrevivência atribuída no âmbito do dimensionamento do pavimento. Toma o valor de $2,8 \times 10^{-2}$ para 50% de probabilidade de sobrevivência, $2,1 \times 10^{-2}$ para 85% e $1,8 \times 10^{-2}$ para 95%.

Nottingham

$$\log \epsilon_t = \frac{14,38 \cdot \log V_b + 24,2 \cdot \log Tab - c - \log N}{5,13 \cdot \log V_b + 8,63 \cdot \log Tab - 15,8} \quad (2.7)$$

ϵ_t - Extensão de tracção (em micro unidades – $\times 10^{-6}$)

N - nº de repetições de carga para determinado eixo padrão (em milhões – $\times 10^6$)

V_b - percentagem volumétrica de betume no volume total (%)

Tab – Temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola (°C)

$c = 46,82$, para N provocando estado critico

$c = 46,06$, para N provocando estado de ruína.

$$\epsilon_{dp} = \frac{A}{\left(\frac{N}{fr}\right)^{cl}} \quad (2.8)$$

ϵ_{dp} - Extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação (em micro unidades – $\times 10^{-6}$)

N - nº de repetições de carga para determinado eixo padrão (em milhões – $\times 10^6$)

fr – Factor de indução de assentamento dependendo do tipo e mistura betuminosa

A = 250 para N provocando estado crítico

A = 451,29 para N provocando estado de ruína

cl = 0,27 para N provocando estado crítico

cl = 0,28 para N provocando estado de ruína

Para além destes métodos existem alguns procedimentos mais simples, ou baseados directamente nesses métodos, como é o caso de Portugal com o desenvolvimento de um “Catálogo” designado por Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV, 1995).

Existem ainda os métodos baseados no “desempenho de serviço” como o é o caso do manual de dimensionamento AASHTO de 1993 (Branco *et al.*, 2008).

Como referido anteriormente as acções do tráfego e dos agentes climáticos são os principais factores de ruína dos pavimentos rodoviários flexíveis, por isso são considerados fundamentais no dimensionamento dos mesmos.

Em Portugal o dimensionamento das estruturas de pavimentos é feito para um período de 20 a 30 anos e apenas é considerado o efeito do tráfego dos veículos pesados (MACOPAV, 1995). A portaria nº 1092/97 de 3 de Novembro fixa, para além de outras características, os pesos máximos para os diversos veículos pesados e para os diferentes tipos de eixo a nível nacional.

Para o dimensionamento de pavimentos são usados dois tipos de eixo-padrão, um de 80 kN e outro de 130 kN. O eixo-padrão é um eixo simples contendo em cada uma das extremidades, dois pneus. Em Portugal é mais frequente a utilização do eixo-padrão de 80 kN que está associado ao dimensionamento de pavimentos flexíveis. O eixo-padrão de 130 kN é utilizado para os pavimentos semi-rígidos. O Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV, 1995) foi precisamente adoptado para estes dois tipos de situações.

2.5. Patologias

Após construção ou reabilitação dos pavimentos, estes, estão imediatamente sujeitos às acções diversas que contribuem para a redução de qualidade dos mesmos.

O processo de evolução das degradações, aparentes ou não, baseia-se no “princípio da cadeia de consequências” (Branco *et al.*, 2008) que diz, que uma degradação não evolui separadamente, mas sim dá origem a outros tipos de degradação que interferem nas características da degradação inicial. Pode-se dizer que as degradações interferem mutuamente. Este processo de degradação pode dividir-se em dois factores: o factor passivo compreendendo as características do pavimento (espessura das camadas, materiais e qualidade da construção) e o factor activo considerando as acções do tráfego e agentes climáticos.

A acção da luz solar, as variações de temperatura, os materiais granulares, o tráfego e a acção da água, são os principais factores que contribuem para a degradação de pavimentos. A degradação começa a ser notória à superfície através de fendas e deformações. A evolução destas degradações superficiais pode mesmo levar à desagregação da camada de desgaste. O quadro 2.7 indica os principais grupos e tipos de degradações.

Quadro 2. 7 - Grupos e tipos de degradações (Pereira e Miranda (1999), citado em Branco *et al.* (2008))

Grupos	Tipos de Degradações		
Deformações	Abatimento	- Longitudinal - Transversal	- Berma - Eixo
	Deformações Localizadas		
	Ondulação		
	Rodeiras	- Grande raio (camadas inferiores) - Pequeno raio (camadas superiores)	
Fendilhamento	Fendas	- Fadiga - Longitudinais - Transversais - Parabólicas	- Eixo - Berma
	Pele de Crocodilo	- Malha fina (≤ 40 cm) - Malha larga (> 40 cm)	
Desagregação da camada de desgaste	Desagregação superficial Cabeça de gato Pelada Ninhos (covas)		
Movimento de materiais	Exsudação Subida de finos		

2.5.1. Deformações

O grupo das deformações divide-se nos seguintes tipos de degradação: Ondulação, deformações localizadas, rodeiras e abatimentos, sendo as duas últimas as mais significativas. As rodeiras (Fig. 2.10) são deformações longitudinais que se desenvolvem com a passagem dos veículos repetidamente na mesma linha. As elevadas temperaturas, a carga dos veículos pesados e a pressão de enchimento dos pneus são factores favoráveis ao agravamento deste tipo de anomalias.

Os abatimentos subdividem-se em longitudinais e transversais e podem ocorrer devido a vários factores entre os quais: as condições de drenagem, a capacidade de suporte de fundação e as camadas estruturais de reduzida compacidade.



Figura 2. 10 - Rodeira de grande raio (Estrada IC20 Acessos – Almada, 2011)

2.5.2. Fendilhamento

A degradação devida ao fendilhamento é a mais frequente nos pavimentos rodoviários flexíveis. O aparecimento deste tipo de patologia é sinal que o estado de degradação do pavimento já é avançado e com isso provoca a diminuição das qualidades estruturais. Esta diminuição deve-se principalmente a factores como, a qualidade dos materiais, a agressividade do tráfego e as acções climáticas. A redução da capacidade de suporte de fundação também é afectada pois encontrando-se o pavimento com fendas a probabilidade de infiltração para camadas inferiores é maior.

Os tipos mais usuais deste grupo de degradação são: as fendas isoladas e ramificadas, estas últimas podem formar entre si malhas, mais conhecidas como a “pele de crocodilo” (Fig. 2.12). As fendas isoladas devem-se sobretudo à fadiga do pavimento (fendas por fadiga) e podem ser longitudinais (Fig. 2.11), transversais e parabólicas. A “pele de crocodilo” é a degradação mais grave deste grupo. A evolução das fendas ramificadas formam uma malha que pode ter a classificação de malha fina ou larga consoante as larguras, conforme mostram as Figs. 2.12 e 2.13, onde existem zonas com malhas mais largas e outras com malhas mais finas.



Figura 2. 11 - Fenda Longitudinal (Rua Infante D. Henrique – Seixal, 2011)



Figura 2. 12 - Pele de Crocodilo (Avenida de Vale de Milhaços – Seixal, 2011)

2.5.3. Desagregação da camada de desgaste

A desagregação da camada de desgaste resulta da perda de qualidade superficial da mesma. Esta perda de qualidade resulta, na maioria das vezes, da evolução de degradações anteriores, principalmente fendilhamento e o fenómeno de “pele de crocodilo”. Outros factores que contribuem para estes fenómenos de desagregação da camada de desgaste são, a qualidade dos materiais, as acções climáticas, deficiências de fabrico e execução das misturas betuminosas.

É possível visualizar esse exemplo na Fig. 2.13 onde resulta a formação de uma cova devido ao avançado estado de degradação devido à “pele de crocodilo”.



Figura 2. 13 – Cova (Avenida de Vale de Milhaços – Seixal, 2011)

2.5.4. Movimento dos materiais

Como o próprio nome indica, este grupo de degradações centraliza-se na movimentação dos materiais que constituem as diferentes camadas de um pavimento. Um dos exemplos concretos é a subida do material fino, ou seja, numa camada de desgaste com fendilhamento e com água retida no interior, a passagem de veículos provoca compressão e expulsa a água através das fendas, transportando os finos para a superfície (Branco *et al.*, 2008).

Outro tipo de degradação deste grupo é a exsudação do betume, que consiste na migração do ligante presente na mistura betuminosa para a superfície do pavimento, ocorrendo principalmente na zona de passagem dos pneus dos veículos. As principais causas da migração do betume para a superfície são, o excesso de ligante e o excesso de fracção fina dos agregados o que leva a uma porosidade reduzida (Antunes *et al.*, 2005).

Em suma, ao analisar os grupos patológicos referenciados, verifica-se que em grande parte são consequência uns dos outros.

3. Misturas Betuminosas com adição de betume modificado com borracha

3.1. Introdução

As primeiras utilizações de granulado de borracha reciclada de pneus em fim de vida útil, começaram nos anos 40 por intermédio da U.S. *Rubber Reclaiming Company*, que produziu uma mistura composta por betume e borracha não vulcanizada (Vicente, 2006).

Charles H. McDonald, engenheiro de estradas, considerado o grande pioneiro do betume-borracha, desenvolveu, em 1963, diversas pesquisas com o objectivo de criar um material altamente elástico para a reparação de superfícies de pavimentos betuminosos. Dessas pesquisas obteve o desenvolvimento de um produto que continha cerca de 25% de borracha de pneus moída, misturado a 190° C durante 20 minutos.

A partir dos anos 80, já com alguns anos de desenvolvimentos e aperfeiçoamentos de ensaios e resultados, a reciclagem da borracha para introdução nas misturas betuminosas começou a ser vista como uma boa alternativa para diminuição dos problemas ambientais causados pela disposição de resíduos sólidos. Perante este desenvolvimento e aperfeiçoamento foi criada a norma americana ASTM D 6114, a qual, faz a caracterização do betume modificado com borracha (BMB).

Administrações rodoviárias dos estados norte-americanos como Arizona (ADoT – *Arizona Department of Transportation*), Califórnia (Caltrans - *California Department of Transportation*), Texas (DoT – *Texas Department of Transportation*) e Florida (DoT – *Florida Department of Transportation*) foram pioneiras no fabrico e aplicação de misturas betuminosas com betume-borracha e publicaram vários resultados ao longo dos anos referentes ao comportamento mecânico das misturas em laboratório e em trechos experimentais.

Em Portugal o desenvolvimento destas misturas betuminosas com betumes modificados com borracha fez-se a partir de 1999. A empresa portuguesa RECIPAV foi pioneira na aplicação deste tipo de misturas, em Portugal, através do processo da via húmida seguindo a Norma Americana ASTM D 6114.

3.2. Borracha de pneus em fim de vida útil

Em Portugal anualmente são gerados mais de 7 milhões de pneus usados de diferentes categorias, desde pneus que equipam veículos de passageiros (ligeiros e pesados) até pneus de grande porte utilizados em máquinas de engenharia civil. Em volume correspondem a cerca de 90.000 toneladas de pneus (Valorpneu, 2010).

Ao longo do tempo, em Portugal, o crescimento das vias de circulação rodoviárias fez com que a produção de veículos tenha aumentado e como consequência cresceu o número de pneus usados (fim de vida útil) e o problema do destino final deste resíduo.

Até ao início da última década a grande parte destes pneus usados eram depositados em terrenos de céu aberto, beiras de estradas e mesmo cursos de água. Estes depósitos são considerados dos mais agressivos ao meio ambiente e introduzem graves problemas de saúde pública. Um dos mais graves, é o perigo de incêndio pois são muito difíceis de extinguir devido á sua complexa composição química, essencialmente compostos de carbono orgânico com enxofre e com presença de cloro ou bromo, a combustão não controlada a baixas temperaturas leva à formação de compostos extremamente tóxicos como, por exemplo, as dioxinas. Outro dos problemas, não tanto a nível nacional mas sim em países tropicais, é a formação de poças de água proveniente das

chuvas, no interior dos pneus que dão origem à procriação de mosquitos que podem levar a propagação de doenças. A biodegradação é outro dos perigos pois ocorre lentamente (não inferior a 150 anos) e sendo o pneu constituído por substâncias tóxicas, quando libertadas na atmosfera contaminam solos, rios e o lençol freático (Campos, 2006).

Com a proibição destes depósitos (Fig. 3.1) a única solução encontrada foi a designada co-incineração que consistia na queima dos pneus em fornos de cimenteiras. Entretanto neste processo foram sempre surgindo problemas, no que diz respeito a questões de impacto ambiental e assistiu-se a uma paragem do tratamento deste resíduo, o pneu.



Figura 3. 1 – Depósito de pneus a céu aberto (Azinheiragate.Blogspot, 2008)

Os pneus usados destes veículos são um grande recurso como material de uso secundário, através dos processos de recauchutagem, valorização energética e reciclagem. A recauchutagem é um processo industrial através do qual ocorre o reacondicionamento de um pneu usado, por aplicação de um novo piso, ou novo piso e novas paredes laterais, com o objectivo de prolongar a vida útil do mesmo. O processo de valorização energética consiste na utilização dos pneus usados, como combustível complementar ou alternativo para o fabrico de cimento ou para a produção de electricidade e vapor em unidades de co-geração devido ao seu elevado poder calorífico (Valorpneu, 2010).

A reciclagem do resíduo pneu é realizada também por processos industriais, obtendo-se como produtos finais os vários elementos constitutivos e individualizados dos pneus: borracha (na forma de granulado e pó), aço (em pequenos troços) e têxteis. Dois dos processos mais conhecidos de reciclagem de pneus usados para obtenção da borracha granulada para utilização na modificação de betumes são, o processo mecânico e o processo criogénico que são descritos na secção 3.4.

Em termos de legislação, em Portugal, o Decreto-Lei n.º 111/2001, de 6 de Abril e mais tarde com alterações introduzidas pelo Decreto-Lei n.º 43/2004, estabelecem os princípios e as normas aplicáveis à gestão de pneus e pneus usados, tendo como objectivos a prevenção da produção destes resíduos, a recauchutagem, a reciclagem e outras formas de valorização, visando-se a redução da quantidade de resíduos a eliminar, bem como a melhoria do desempenho de todos os intervenientes no ciclo de vida dos pneus.

Desde 2003, que o Sistema Integrado de Gestão de Pneus Usados (SGPU), gerido pela Valorpneu, dá resposta ao armazenamento, transporte e encaminhamento para destino final de valorização dos pneus usados que anualmente são produzidos. Este sistema é financiado pela cobrança de um ecovalor discriminado na factura aquando da venda dos pneus, ecovalor esse que difere consoante a categorias dos veículos (Valorpneu, 2010).

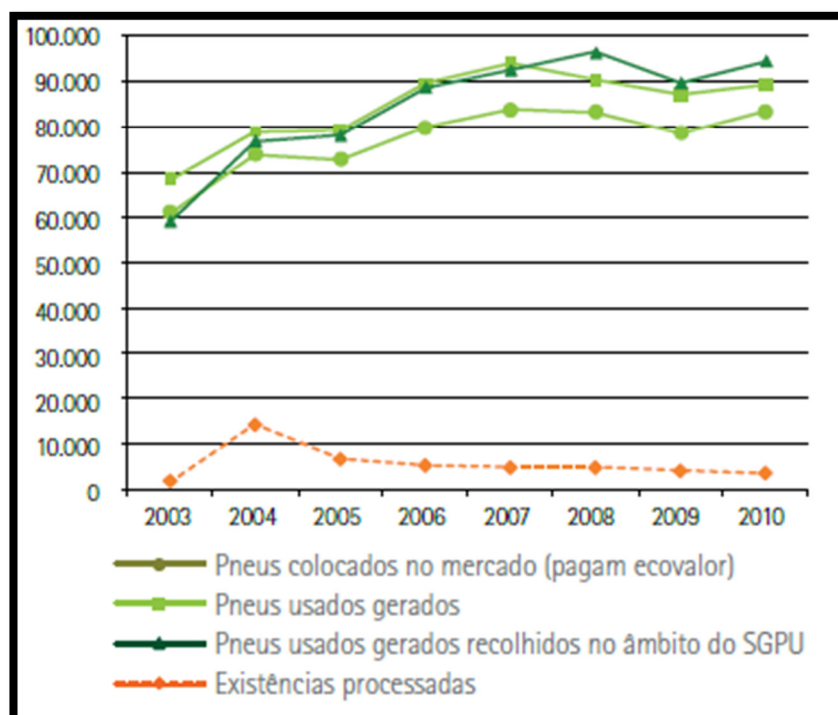


Figura 3. 2 - Evolução dos pneus colocados, gerados e recolhidos no mercado (Valorpneu_A, 2010)

Na Fig. 3.2 observa-se a evolução da recolha de pneus desde 2003 no âmbito do SGPU. Portugal já recolhe a quase totalidade dos seus pneus usados. Em 2007 o País recolheu cerca de 98,5 por cento destes resíduos, um valor acima da média europeia, que se situa nos 87 por cento. No ano de 2008 foi atingindo o valor máximo de recolha de pneus com valores superiores a 90.000 ton/ano (Valorpneu_A, 2010).

Hoje em dia o crescimento sustentável de uma sociedade passa pela reciclagem e reutilização. Empresas como a Biosafe (Ovar) e Recipneu (Sines) são as grandes responsáveis pela reciclagem da grande parte dos pneus usados em Portugal. Um dos destinos da reciclagem de pneus é os pavimentos, com a modificação dos betumes através da adição da borracha reciclada. No gráfico abaixo é possível verificar as diversas aplicações do granulado de borracha proveniente da reciclagem de pneus. A sua aplicação na modificação de betumes (BMB) apresentam uma percentagem relativamente baixa, facto este deve-se aos estudos sobre este tipo de pavimentos terem início apenas em 1999 e poucas empresas produzirem as misturas com BMB.

De acordo com os relatórios de contas da Valorpneu de 2009 (Valorpneu_A, 2010) e 2010 (Valorpneu_A, 2011) foi possível verificar um aumento da percentagem da utilização da borracha para modificação dos betumes. Em 2009 tinha o valor de 6,0% e no ano de 2010 o valor de 11,5%. Na Fig.3.3 é apresentado um gráfico com as diferentes percentagens de aplicação da borracha no ano de 2010.

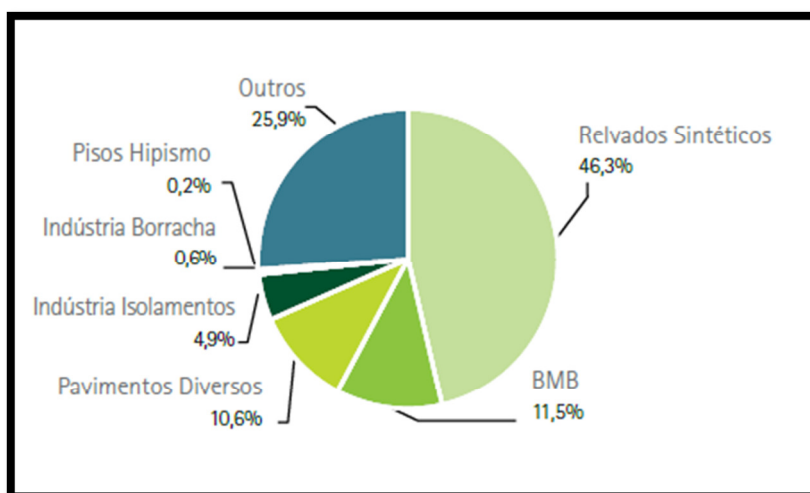


Figura 3. 3 - Diferentes aplicações da borracha em pavimentos em 2010 (Valorpneu_A, 2011)

3.3. Propriedades dos pneus

A borracha é o principal material do pneu representado cerca de 40% da sua massa (Andrietta (2002) citado em Fontes (2009)). Essa borracha pode ser de dois tipos diferentes, borracha natural ou borracha sintética.

O primeiro material conhecido como borracha (“*caoutchouc*” derivado da palavra índia “*caa-o-chu*”) é o poliisopreno recolhido da seiva da árvore *Hevea Brasiliensis*, látex, sendo por tal facto conhecido como borracha natural (NR – *Natural Rubber*). A borracha sintética corresponde a um tipo de polímero com propriedades físicas parecidas à borracha natural, sendo proveniente do petróleo ou do gás natural (Gomes, 2011).

Para além da borracha natural e sintética os pneus são constituídos por outros materiais com propriedades muito diferentes. A Fig. 3.4, mostra alguns desses materiais.



Figura 3. 4 - Materiais constituintes do pneu (Valorpneu, 2010)

A constituição de um pneu divide-se sobretudo em três fases; o revestimento interior composto pelo talão e aros de talão (1,2,3), constituído internamente por arames de aço e, tem como função manter o pneu junto ao aro de forma a terem um movimento conjunto; um revestimento intermédio composto por lonas (4,5) coladas, umas sobre as outras com cabos de aço cruzados entre si com a finalidade de resistir à pressão e ao peso; por último o revestimento exterior (6,7,8,), que fica directamente em contacto com o pavimento, devido à composição da borracha e agentes químicos deve ser capaz de resistir ao desgaste, à abrasão e ao elevado aquecimento.

A composição dos principais materiais constituintes dos pneus e especificamente da borracha é mostrada nos quadros 3.1 e 3.2. Estas percentagens de material estão sujeitas a alterações conforme a categoria dos pneus e dos próprios fabricantes.

Quadro 3. 1 - Composição de pneus ligeiros e pesados (Convenção de Basileia, (1999) citado em Valorpneu, (2010))

Material	Pneu Ligeiro	Pneu Pesado
Borracha / Elastómeros	47 %	45 %
Negro de Fumo	21,5 %	22 %
Aço	16,5 %	25 %
Têxtil	5,5 %	--
Óxido de Zinco	1 %	2 %
Enxofre	1 %	1 %
Aditivos	7,5 %	5 %

Quadro 3. 2 - Análise Elementar da Borracha (Convenção de Basileia, (1999) citado em Valorpneu, (2010))

Composição	Percentagem (%)
Carbono	78-83
Hidrogénio	6-7
Oxigénio	3,5-5
Nitrogénio	0,2-0,4
Enxofre	1 - 1,6
Cloro	0,07 - 0,1
Cinzas	5 – 10

No que diz respeito à posterior utilização do granulado de borracha para o fabrico de misturas betuminosas modificadas, salientam-se os materiais antioxidantes, como por exemplo o negro de fumo cujas propriedades são mantidas quando se dá a modificação do betume. Essas propriedades ajudam as misturas betuminosas a resistir ao envelhecimento devido aos raios ultra-violetas (UV).

Para se ter uma ordem de grandeza da quantidade de borracha reciclada na produção de misturas com BMB para uma estrada comum, é utilizado um pneu por cada metro quadrado de estrada, ou seja, 4.000 mil pneus num quilómetro (Recipav, 2008).

3.4. Processos de Obtenção do granulado de borracha

Os dois principais tipos de obtenção de borracha granulada de pneus usados para utilização na modificação de betumes são o processo mecânico (ambiente) e o criogénico. Em ambos os processos os pneus são recebidos inteiros e requerem uma limpeza prévia de materiais que os acompanhem e que possam danificar os equipamentos trituradores, tais como pedras ou peças metálicas.

O Processo mecânico (utilizado pela empresa Biosafe), consiste na sequência de trituração à temperatura ambiente dos pneus usados. De acordo Reschner (2006) (citado em Fontes, 2009) tem o seguinte procedimento de trabalhos (Fig. 3.5).

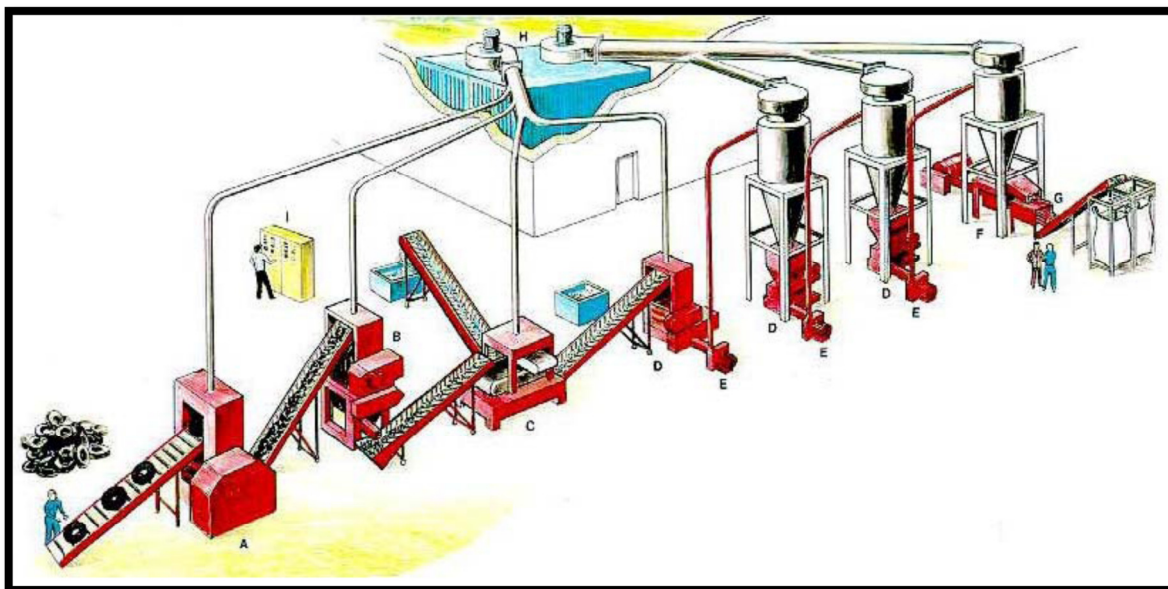


Figura 3. 5 - Esquema representativo do processo mecânico (Fontes, 2009)

O processo inicia-se com uma primeira trituração dos pneus (A), reduzindo-os a tamanhos com aproximadamente 50 mm denominados de “chips”. De seguida os “chips” de pneus passam noutro num triturador secundário (B) reduzindo o seu tamanho para 10mm. Nesta fase também se dá grande parte da separação do aço e das fibras com os grânulos de borracha.

Numa terceira fase o aço é removido magneticamente e as fibras são removidas através de peneiros vibratórios e moinhos de vento (C). O pó gerado e as fibras são direccionados para um receptor de fibras e pó (H).

Com o objectivo de produzir granulado de borracha com tamanhos muito finos (inferiores a 10mm) segue-se a passagem por vários trituradores (D) criando várias gamas consoante a sua granulometria. São ainda utilizados neste processo um sistema pneumático de carregamento (E), moinho de vento (F) e um separador magnético secundário (G).

No final é feita a colocação em sacos do pó de borracha proveniente dos pneus em fim de vida útil.

As principais vantagens deste processo são os custos reduzidos na operação, fácil manutenção e pouca mão-de-obra. A principal desvantagem é a obtenção de granulado mais fino pois são necessárias mais passagens pelos trituradores.

O Processo criogénico, caracteriza-se pelo arrefecimento através de azoto líquido dos “chips” provenientes da primeira trituração. De acordo com a Recipneu tem o seguinte procedimento de trabalhos.



Figura 3. 6 - 1ª fase de trituração (Recipneu, 2010)



Figura 3. 7 - Túnel Criogénico (Recipneu, 2010)

Como acontece no processo ambiente, o processo criogénico inicia-se com uma primeira trituração dos pneus (Fig. 3.6) reduzindo a tamanhos com aproximadamente 50 mm denominados de “chips”.

De seguida os “chips” criados são gelados num túnel criogénico (Fig. 3.7) composto por azoto, que entra no túnel a temperaturas que rondam os 196 °C negativos. Através da acção de moinhos de martelo e com o congelamento destes chips, estes são quebrados em várias dimensões granulométricas. Numa fase seguinte é feita a separação do aço e das fibras que são removidos e são encaminhados para um receptor de fibras e aço.

Os grânulos de borracha saem frios do túnel o que leva a uma secagem para posterior classificação granulométrica, embalagem conforme essa classificação e transporte (Figs. 3.8 e 3.9). De acordo com a Recipneu são reciclados 25.000 toneladas de pneus por ano.

Uma das grandes vantagens deste processo é a capacidade de gerar vários tamanhos, incluindo, tamanhos granulares muito finos e controlar a regularização e uniformização das partículas. Outras das vantagens são a rapidez do processo e a limpeza. A principal desvantagem é o custo devido à utilização do azoto líquido.



Figura 3. 8 - Embalamento do pó de borracha (Recipneu, 2010)



Figura 3. 9 - Carregamento para transporte (Recipneu, 2010)

Analisando os dois processos verifica-se que a grande diferença é a utilização de azoto líquido. O processo criogénico que faz com que as partículas fiquem mais frágeis, sendo quebradas, e assim conseguir-se uma mais fácil distribuição de tamanhos e também formas mais regulares. Pelo contrário no processo ambiente, as partículas são “rasgadas” por serem mais rígidas e com isso, uma maior dificuldade em obter as mesmas formas regulares e diferentes tamanhos granulométricos. Pode ser observado na Fig. 3.10 a morfologia e forma das partículas de borracha provenientes dos dois processos referidos.

O pó de borracha proveniente da reciclagem de pneus através destes dois métodos tem vindo a ser aplicado, na modificação de betumes para fabrico de misturas betuminosas para aplicação em camadas de pavimentos. De acordo com a Recipneu o pó de borracha com dimensões inferiores a 6 mm (Fig. 3.11) tem como fim a utilização para a modificação dos betumes.

Um factor importante para a utilização do granulado de borracha, na modificação de betumes para utilização em misturas betuminosas é o seu armazenamento. Segundo o CETO-EP 15.03 (2009) o granulado de borracha deve ser transportado em cisternas ou sacos prefabricados com material impermeável, de modo a evitar a entrada de água. Os sacos devem ser armazenados em locais secos, protegidos da chuva e da luz solar.

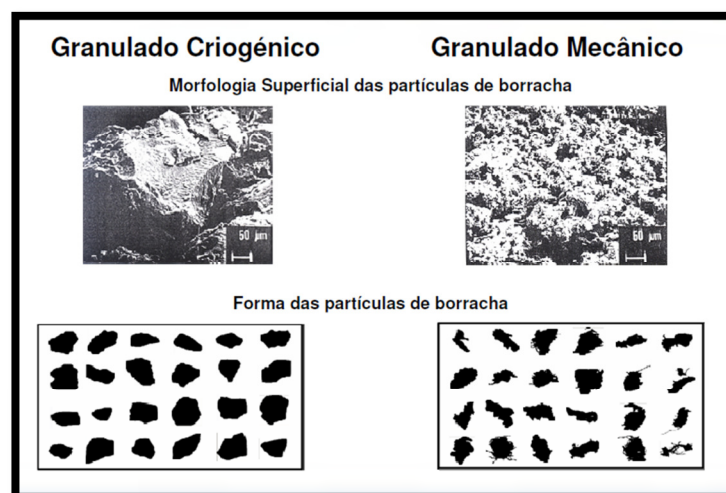


Figura 3. 10 - Morfologia e forma das partículas de borracha “chips” (Pampulim, 2010)



Figura 3. 11 - Pó de borracha com dimensão ≤ 6 mm

3.5. Betumes Modificados com Borracha (BMB)

3.5.1. Introdução

O conceito de betume modificado com borracha consiste na adição ao betume convencional, previamente aquecido, de uma percentagem de pó de borracha, proveniente da reciclagem de pneus.

Com a introdução da borracha nas misturas betuminosas pretende-se a criação de um produto com melhores características mecânicas de forma a aumentar a vida útil dos pavimentos. Resistência à fadiga, deformações permanentes, susceptibilidade térmica e o envelhecimento são as principais propriedades a beneficiar com a utilização deste produto.

A modificação do betume só ocorre, de facto, quando a alteração de propriedades, físicas e reológicas, é originada numa reacção química entre o betume e o agente modificador.

Esta reacção combina várias fases como se pode observar na Fig. 3.12. De acordo com Holleran & Reed (2000) (citado em Fontes, 2009), a reacção química das partículas de borracha juntamente com as fracções voláteis (resinas, maltenos) e os asfaltenos formam uma película de “gel” sobre as partículas fixando as fracções leves.

A reacção derivada da mistura do betume com a borracha reciclada é influenciada pelo tempo de digestão, temperatura, a quantidade e tipo de borracha utilizada (Baker *et al.* (2003) citado em Fontes, (2009)).

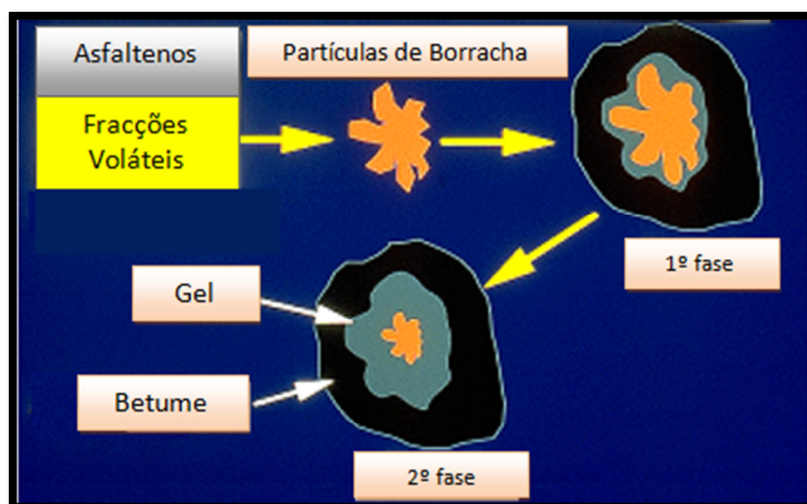


Figura 3. 12 - Diferentes fases da reacção betume-borracha (adaptado de Holleran & Reed (2000) citado em Fontes (2009))

A interacção entre o betume e o granulado de borracha é um processo de absorção de fracções aromáticas do betume por parte das fracções poliméricas do granulado de borracha. Ao tempo, até que a concentração destas fracções seja uniforme e que seja conseguido o equilíbrio na dilatação das partículas, dá-se o nome de tempo de digestão. Este processo de absorção provoca o amolecimento e a dilatação das partículas de borracha e por outro lado o endurecimento do betume puro por perda dos óleos aromáticos, provocando uma redução da distância inter-partículas de borracha através da qual se obtém um aumento de viscosidade. Ainda neste processo de digestão dá-se a dissolução da borracha no betume através dos ácidos carboxílicos presente no betume fixando os maltenos, impedindo assim que desapareçam por acção da temperatura, radiação solar, tráfego e oxidação (Pereira *et al.*, 2002).

A temperatura, a que se dá a reacção é um factor muito importante. Por um lado se a reacção se der a temperaturas muito altas o BMB tem tendência a envelhecer mais rapidamente, por outro lado, se a reacção se der a temperaturas excessivamente baixas esta pode ficar incompleta tornando o BMB heterogéneo.

3.5.2. Métodos de Fabrico das Misturas BMB

Os métodos de produção usados para o fabrico de misturas com BMB são, o método por via húmida e o método por via seca.

Em 1960, Charles H. McDonald, na cidade de Phoenix, iniciou estudos com betumes e materiais de borracha tornando-se essencial no desenvolvimento do processo por via húmida na produção de betume-borracha (também designado de *McDonald process*). McDonald foi o primeiro a utilizar o betume-borracha em misturas betuminosas a quente com o objectivo da reparação e manutenção superficial dos pavimentos. Desde então várias empresas americanas desenvolveram experiências com betumes-borracha e misturas betuminosas (Fontes *et al.*, 2006).

Nos anos 60, duas empresas Suecas, começaram a desenvolver uma nova mistura que continha uma percentagem de granulado de borracha reciclada de pneus como agregado (Via Seca), à qual foi atribuído o nome comercial de *Rubit sem* (Martins (2004), citado em Vicente (2006)).

Em 1978 deu-se, nos Estados Unidos da América, a primeira aplicação em pavimento de misturas betuminosas pelo processo de via seca (Caltrans (2003), citado em Dias (2011)).

Nos Estados Unidos da América houve um maior desenvolvimento no fabrico e aplicação de misturas betuminosas através do processo por via húmida. Por outro lado na Europa a investigação e aplicação de misturas betuminosas através do processo por via seca foi a mais explorada. Em Portugal seguiu-se a linha de investigação Norte-americana, sendo o método por via húmida, o mais utilizado. Estas misturas poderão ser de dois tipos, misturas abertas e misturas rugosas com diferentes teores de borracha.

3.5.2.1. Método por via húmida

No método por via húmida (*wet process*) o pó de borracha é misturado juntamente com o ligante betuminoso base alterando as características do mesmo. Dentro deste método existem dois tipos de fabrico, o *continuous blend* (in situ) e o *terminal blend* (refinaria). O fabrico destes betumes modificados pode ainda realizar-se com diferentes teores de borracha, os betumes com alto, médio e baixo teor de borracha.

As misturas por via húmida são todas as que envolvam a mistura prévia do betume e da borracha, a altas temperaturas (160° a 210°C), durante um determinado período de tempo de digestão (60 min a 240 min), juntando por fim ao agregado. Uma vantagem deste processo é que permite um controlo das propriedades do ligante, sendo possível obter misturas *standard*. Uma desvantagem da via húmida é a aplicação de granulado de borracha com dimensões reduzidas, revelando-se portanto, a metodologia de reciclagem muito importante.

Através do processo húmido, com granulado de borracha proveniente do processo mecânico e a adição de óleos aromáticos consegue-se melhores desempenhos de misturas com BMB (Pereira *et al.*, 2002).

No processo da via húmida o tempo de interacção mínimo e máximo necessário para se obter a interacção física entre o betume e o granulado de borracha ocorre antes do fabrico da mistura betuminosa. (Dias, 2011).

1) Contínuous Blend (Fabrico In Situ)

Este tipo de fabrico das misturas com BMB consiste na modificação do betume numa unidade de produção (Fig. 3.13) introduzida entre a cisterna de armazenamento do betume base e o misturador da central (Baptista *et al.*, 2010).



Figura 3. 13 - (a) Unidade móvel para modificação do betume

(b) Carregamento de transporte para obra (Antunes *et al.*, 2000)

Esquemáticamente pode-se observar na Fig. 3.14 o processo de fabrico do tipo “*continuous blend*”. A unidade de produção referida é um tanque onde se vai processar a modificação do betume base com o pó de borracha. Após a modificação do betume, este segue para o misturador da central onde é misturado com os agregados sendo depois encaminhado para os silos de armazenamento para posterior carregamento de veículos para transporte a obra. O processo “*contínuous blend*” conduz a betumes modificados com alta percentagem de borracha (BMBAP).

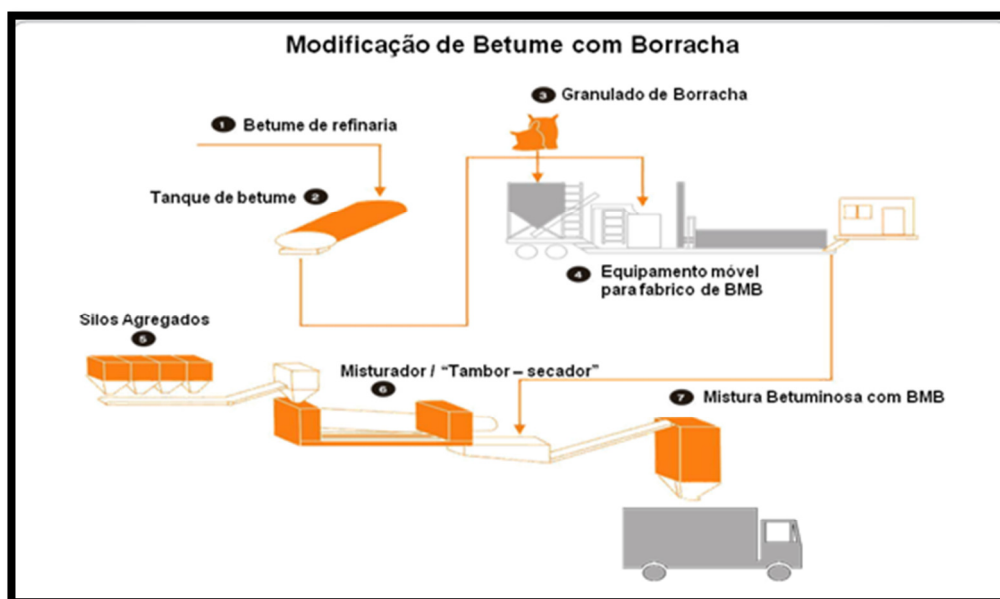


Figura 3. 14 - Processo Contínuous Blend (Recipav, 2005)

O betume-borracha de alta viscosidade (BBA) é um betume com mais de 18% de granulado de borracha em relação à massa total do ligante (Baptista *et al.*, 2010).

De acordo com o Caderno de Encargos da, Estradas de Portugal, para os betumes modificados com alta percentagem de borracha, o seu armazenamento não deverá exceder 10 horas, a uma temperatura superior a 160 ° C, e nunca excedendo 195 ° C, em permanente agitação, de forma a garantir a homogeneidade do ligante. Em casos excepcionais devidamente justificados, poder-se-á armazená-lo por períodos superiores, devendo neste caso, o ligante ser mantido a uma temperatura nominal de 130 ° C. Uma vez terminado o período de armazenamento, o ligante a ser utilizado na mistura betuminosa deverá ser homogeneizado e novamente aquecido, lenta e uniformemente, até atingir a temperatura de fornecimento.

2) Terminal Blend (Refinaria)

O processo “*terminal blend*” está ligado a betumes modificados com baixa e média percentagem de borracha (respectivamente, menor que 8% e de 8 a 15 % em relação à massa total de ligante). Este processo de modificação ocorre em refinaria pois apresenta boas características de armazenagem. Mais recentemente tem vindo a ser explorada por algumas entidades como se verá adiante.

3.5.2.2. Método por Via Seca

A mistura por via seca (*dry process*) consiste, na mistura de granulado de borracha grosso devidamente graduado com os agregados aquecidos, sendo de seguida adicionado ao betume puro aquecido (Pereira *et al.*, 2002).

A via seca é menos comum pois, aumenta os custos devido à sua prestação inferior, ter pouca reprodutibilidade e apresentar dificuldades na construção dos pavimentos. Por outro lado este método permite utilizar maiores quantidades de borracha o que o torna ambientalmente vantajoso (Antunes *et al.*, 2004).

Este método foi apenas testado uma vez em Portugal na Estrada Nacional 370, cujo objectivo foi contribuir para a validação deste tipo de misturas com comportamentos semelhantes às misturas equivalentes produzidas por via húmida (Dias, 2011).

Neste processo o material é tratado como um agregado e os valores mais usuais de substituição de agregado natural por partículas de borracha são da ordem de 1 a 2% podendo chegar aos 5%. Obtêm-se misturas muito flexíveis, de grande recuperação elástica mas de difícil compactação, adequadas apenas para camadas de desgaste. Este tipo de misturas, podem ser realizadas por qualquer empresa de fabricação de misturas betuminosas (Almeida, 2003).

Devido ao facto da borracha ser misturada inicialmente com os agregados, o controlo das propriedades do ligante poderá tornar-se mais difícil daí fazer-se uma aplicação específica para cada obra.

No processo da via seca o tempo de interacção mínimo e máximo necessário para se obter a interacção física entre o betume e o granulado de borracha ocorre desde o fabrico na central de produção até à aplicação das misturas no pavimento (Dias, 2011).

3.5.3. Propriedades do betume-borracha

A borracha de pneus usados faz parte de um grupo denominado, polímeros, que são moléculas grandes e que juntado ao betume altera a reologia dos mesmos. Outros dos polímeros usuais para alterar as características do betume convencional são, o SBS (*Styrene Butadiene Copolymer*), o SBR (*Styrene Butadiene Rubber*), o EVA (*Ethylene Vinyl Acetate*) e as resinas epóxis (Fontes, 2009).

Como já foi referido no ponto 2.3.1.2, as propriedades dos betumes são caracterizadas através de alguns ensaios. Com a adição de borracha nos betumes as propriedades destes sofrem alterações.

No ensaio de penetração do betume a 25 °C, a adição de borracha leva a valores de penetração mais baixos. Esta diminuição dos valores de penetração deve-se sobretudo ao grande aumento da viscosidade.

O ensaio do ponto de amolecimento anel e bola fornece permite classificar o betume para elevadas temperaturas. Com a introdução da borracha os resultados são influenciados por vários factores, entre os quais, consistência do betume convencional, tipo de borracha, percentagem de borracha e tempo de digestão.

A viscosidade do betume-borracha é caracterizada pelo cálculo da viscosidade cinemática. Esta viscosidade cinemática sofre um aumento com a adição de borracha, o que permite obter melhores características mecânicas às misturas betuminosas finais, entre elas, a redução da propagação de fendas, menor susceptibilidade térmica, maior durabilidade, maior resistência aos raios ultravioletas e infravermelhos o que retarda o envelhecimento da mistura.

Devido ao aumento da viscosidade do betume-borracha deve ser feita também uma avaliação das propriedades elásticas, com o ensaio de resiliência (ASTM D 5329, 1996). Este ensaio indica a recuperação elástica do material que é expressa em percentagem e consiste no alongamento de um provete de betume até 20 cm que permanece estável durante 5 minutos. Depois o provete é cortado ao meio e deixa-se que o betume recupere alguma da sua deformação e no fim mede-se o comprimento total do provete. A diferença inicial e final do comprimento é a recuperação elástica. Para betumes convencionais os resultados desta recuperação elástica variam de 0 a 5% enquanto para os betumes-borracha esses valores aumentam para 40 a 50% (Hicks & Epps (2000) citado em Fontes, (2009)).

Poderão ser feitos ainda ensaios de simulação de envelhecimento através do ensaio RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*). O método especificado não é aplicável a alguns ligantes modificados ou àqueles cuja viscosidade é muito elevada para conseguir uma película móvel. A amostra poderá sair para fora do recipiente de vidro e pingar nas resistências de aquecimento da estufa, durante o ensaio.

Para além das propriedades dos betumes convencionais influenciarem as características finais do ligante BMB, também as propriedades da borracha, quer físicas e químicas, vão influenciar as características finais dos betumes modificados. A granulometria, o teor de borracha e a composição química são as principais propriedades.

A granulometria é uma das propriedades que influencia o produto final BMB. Considera-se que, para diâmetros mais pequenos das partículas de borracha correspondem a maiores áreas específicas, o que melhora a ligação com o betume. A utilização de partículas finas de borracha contribui ainda para, uma modificação mais rápida do betume, uma variação da viscosidade do ligante em função da temperatura e uma boa compatibilidade betume-borracha melhorando as suas propriedades reológicas e consequentemente o aumento da resistência ao envelhecimento. Por outro lado a utilização de partículas de borracha mais grossas contribui para a melhoria da resistência às deformações permanentes do BMB e também pode aumentar significativamente a porosidade das misturas finais (Pereira *et al.*, 2002).

O teor em borracha é outra das propriedades importantes a considerar. O aumento do teor em borracha provoca no BMB, o aumento da viscosidade, aumento da resiliência e do ponto de amolecimento, tornando a susceptibilidade térmica mais baixa. No que diz respeito ao ensaio de penetração a 25°C, o valor de penetração tende a diminuir com o aumento do teor de borracha (20 a 25%). Para valores superiores 25% os valores de penetração tendem a aumentar (Pereira *et al.*, 2002).

Por fim o efeito da composição química da borracha também altera as propriedades finais do BMB. Como referido anteriormente a borracha contém alguns polímeros, sendo um deles a borracha natural que dilata quando se dá a mistura entre o betume e o pó de borracha. Por outro lado, polímeros como, o negro de fumo, resíduos e óleos não dilatam na presença do betume mantendo-se volumetricamente constantes. Devido a estes factos, a percentagem de hidrocarbonetos e de borracha natural são importantes, pois afectam as propriedades do BMB. Altos teores de hidrocarbonetos tornam o BMB mais dúctil e altos teores de borracha natural baixam o peso molecular do BMB o que melhora a ligação deste aos agregados.

Segundo o Caderno de Encargos da, Estradas de Portugal, para o fabrico de betume modificado com borracha, o betume base, previamente aquecido a uma temperatura aproximada de 190°C, é introduzido num misturador. Seguidamente deve proceder-se à admissão, em contínuo, da borracha reciclada de pneus moída, de acordo com a percentagem estabelecida no estudo de formulação. No misturador inicia-se a reacção do betume com a borracha, que terá continuidade na cisterna de armazenamento do betume modificado, para onde será transferido. Para concluir o processo de modificação do betume pela borracha, a mistura de betume e de borracha permanece na referida cisterna durante um período mínimo de 30 minutos, a uma temperatura de 185 °C, em permanente agitação e com controlo da temperatura.

Os betumes podem variar na percentagem de borracha introduzida nas mesmas. De acordo com a pré-norma pr NP 4501: 2010 – Betumes-Borracha: Requisitos para betumes com borracha reciclada de pneus usados, são admitidos betumes de alta viscosidade BBA (superior a 18% de borracha em relação à massa total do ligante), média viscosidade BBM (8 a 15% de borracha em relação à massa total do ligante) e baixa viscosidade BBB (inferior a 8% de borracha em relação à massa total do ligante). Dentro destes limites os valores podem variar ligeiramente de empresa para empresa na quantidade exacta de borracha. Os betumes de baixa e média percentagem de borracha são estáveis ao armazenamento e são geralmente produzidos em fábrica. Os de alta percentagem não são estáveis ao armazenamento sendo utilizadas unidades móveis para o fabrico nas centrais de mistura. Nos quadros 3.3, 3.4 e 3.5 estão especificadas as propriedades para os três tipos de betumes modificados com baixa, média e alta percentagem de borracha, respectivamente.

Quadro 3. 3 – Propriedades dos BBB (pr NP 4501: 2010)

Propriedades		Normas	Unid.	BBB 35/50	BBB 50/70
Penetração, 25 °C, 5s		NP EN 1426	0,1 mm	35-50	50-70
Temperatura de Amolecimento – Método Anel e Bola		NP EN 1427	°C	≥ 58	≥ 53
Temperatura de inflamação		EN ISO 2592	°C	≥ 235	
Viscosidade dinâmica a175°C		EN 13302	mPa.s	≥ 250	≥ 150
Ponto de fragilidade Fraass		EN 12593	°C	≤ -5	≤ -8
Recuperação elástica, a 25°C, alongamento de 20 cm		EN 13398	%	≥ 10	
Estabilidade ao armazenamento ¹⁾	Diferença no valor na temperatura de amolecimento	EN 13399 NP EN 1427	°C	≤ 8	
	Diferença no valor da penetração,	EN 13399 NP EN 1426	0,1 mm	≤ 8	≤ 10
Durabilidade, Resistência ao envelhecimento (RTFOT a 163°C NP EN 12607-1)	Variação de massa	NP EN 12607-1	%	≤ + 1,0	
	Penetração Retida		%	≥ 65	≥ 60
	Var. Aumento da Temp. Amolecimento		°C	≥ -4 ≤ 8	≥ -5 ≤ 10
1) Quando o BBB for fabricado <i>in situ</i> não se aplica esta característica em virtude de o produto se destinar a aplicação imediata após produção					

Quadro 3. 4 – Propriedades dos BBM (pr NP 4501: 2010)

Propriedades		Normas	Unid.	BBM 35/50	BBM 50/70
Penetração, 25 °C, 5s		EN 1426: 2007	0,1 mm	35-50	50-70
Temperatura de Amolecimento – Método Anel e Bola		EN 1427: 2007	°C	≥ 65	≥ 58
Temperatura de inflamação		EN ISO 2592	°C	≥ 235	
Viscosidade dinâmica a175°C		EN 13302	mPa.s	≥ 300	≥ 250
Ponto de fragilidade Fraass		EN 12593	°C	≤ -8	≤ -10
Recuperação elástica, a 25°C, alongamento de 20 cm		EN 13398	%	≥ 15	≥ 20
Estabilidade ao armazenamento ¹⁾	Diferença no valor na temperatura de amolecimento	EN 13399 NP EN 1427	°C	≤ 5	
	Diferença no valor da penetração	EN 13399 NP EN 1426	0,1 mm	≤ 8	≤ 10
Durabilidade, Resistência ao envelhecimento (RTFOT a 163°C NP EN 12607-1)	Variação de massa	NP EN 12607-1	%	≥ 0, 8	≥ 1,0
	Penetração Retida	NP EN 1426	%	≥ 70	≥ 65
	Var. Aumento da Temp. Amolecimento	NP EN 1427	°C	≥ -4 ≤ 8	≥ -5 ≤ 10
1) Quando o BBM for fabricado <i>in situ</i> não se aplica esta característica em virtude de o produto se destinar a aplicação imediata após produção					

Quadro 3. 5 – Propriedades dos BBA (pr NP 4501: 2010)

Propriedades		Normas	Unid.	BBA 15/30 ¹⁾	BBA 20/35 ²⁾
Penetração, 25 °C, 5s		EN 1426: 2007	0,1 mm	15-30	20-35
Temperatura de Amolecimento – Método Anel e Bola		EN 1427: 2007	°C	≥ 68	≥ 65
Viscosidade dinâmica, a 175°C		EN 13302	mPa.s	2500 - 4500	
Viscosidade aparente, à saída do tanque de reacção, a 175°C (viscosímetro Haake)		-	Cp	3500 - 5000	
Penetração, 25°C, 1/10 mm		EN 1426: 2007	mm2/s	15 - 30	20 - 35
Recuperação elástica, a 25°C,alongamento de 10 cm)		EN 13398	%	≥ 75	
Ponto de fragilidade Fraass		EN 12593	°C	(a reportar pelo fornecedor)	
Temperatura de inflamação		EN ISO 2592	°C	≥ 235	
Estabilidade ao armazenamento ³⁾	Diferença no valor na temperatura de amolecimento	EN 13399 NP EN 1427	°C	≤ 5	
	Diferença no valor da penetração	EN 13399 NP EN 1426	0,1 mm	≤ 8	≤ 10
Durabilidade, Resistência ao envelhecimento (RTFOT a 163°C NP EN 12607-1)	Variação de massa	NP EN 12607-1 NP EN 1426 NP EN 1427	%	≤ + 0, 8	
	Penetração Retida		%	≥ 60	
	Var. Aumento da Temp. Amolecimento		°C	≤ - 12 ≥ + 12	
1) O BBA 15/30 quando fabricado <i>in situ</i> o betume base é um betume de pavimentação 35/50					
2) O BBA 20/35 quando fabricado <i>in situ</i> o betume base é um betume de pavimentação 50/70					
3) Quando o BBB for fabricado <i>in situ</i> não se aplica esta característica em virtude de o produto se destinar a aplicação imediata após produção					

Em Portugal neste momento as cinco principais entidades que comercializam, para os trabalhos de pavimentação, os betumes modificados com borracha são a RECIPAV, LUSASFAL, PROBIGALP, CEPSE e REPSOL.

RECIPAV

A RECIPAV foi pioneira em Portugal e na Europa, desde 1999, neste tipo de produção de betumes modificados. A modificação do betume é feita através do processo “*continuous blend*” pois, são possuidores de unidades móveis constituídas por um misturador e tanques de reacção com controlo de temperatura, de forma a deslocarem-se às centrais para realização das misturas betuminosas.

O fabrico do betume borracha incorpora no mínimo 20 a 22% de granulado de borracha, sobre o peso total do ligante, sendo portanto um BMB de alta percentagem de borracha. O betume base a modificar deve corresponder a um betume com penetração nominal 35/50 e um ponto de amolecimento de aproximadamente 50 °C.

As misturas produzidas com betumes modificados pela RECIPAV podem dividir-se em duas, ambas descontínuas: as misturas do tipo rugosas (MBR-BMB) e do tipo abertas (MBA-BMB). As misturas rugosas caracterizam-se por, incorporar 8 a 9% de BMB, as espessuras habituais de utilização variam entre os 3 e 6 cm, têm uma porosidade que pode variar entre os 4 e 5% e são utilizadas em camadas de base ou desgaste com funções de diminuição de ruído e atrito (Recipav_A, 2004). As misturas do tipo abertas incorporam 9,5 a 10,5% de BMB, têm uma porosidade que varia entre os 12 a 15%, as espessuras variam entre os 2 e 4 cm e essencialmente o seu objectivo é melhorar as características relativas ao atrito, ruído e projecção de água (Recipav_B, 2004). Esta variação de betume modificado nas misturas está dependente dos critérios de formulação e das condições de utilização.

Para estes dois tipos de misturas MBR-BMB e MBA-BMB foram criados documentos de aplicação DA 15 e DA 3 respectivamente, através do LNEC com o objectivo de criar uma referência para o seu fabrico.

A RECIPAV tem ainda um produto designado como SAM/SAMI - BMB (*Stress Absorbing Membrane/Stress Absorbing Membrane Interlayer*), que é uma Membrana Anti-Propagação de Fendas, ou seja, é uma camada betuminosa com betume-borracha colocada sobre a superfície a reabilitar (SAM), geralmente com espessura a variar entre 1,2 e 1,5 cm. Após esta camada poderá se aplicada uma camada de desgaste final ficando a membrana entre a camada a reabilitar e a nova camada (SAMI). Os principais objectivos são retardar o desenvolvimento de fendas por flexão e reduzir a penetração de água nas camadas inferiores (Recipav_C, 2004).

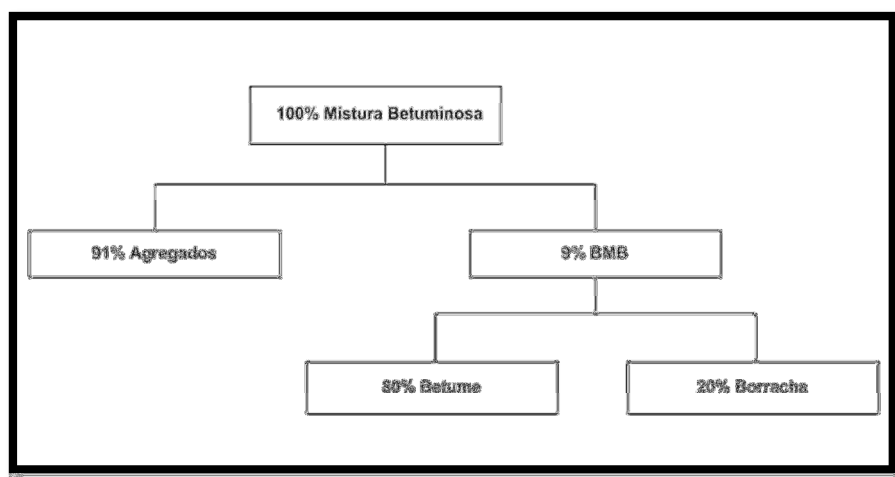


Figura 3. 15 - Caracterização ponderal das misturas com BMB da Recipav (Recipneu, 2010)

LUSASFAL

Os betumes da LUSASFAL são modificados em fábrica (*terminal blend*) utilizando a via húmida e o pó de borracha utilizado para essas misturas é proveniente quer do método mecânico quer do criogénico. Os betumes criados são de baixo teor de borracha, sendo como tal estáveis ao armazenamento para posterior transporte para centrais de produção de misturas betuminosas. Normalmente o processo *continuous blend* tem misturas com pó de borracha reciclada com dimensões inferiores ao processo *terminal blend*. No caso da LUSASFAL conseguem-se produzir betumes modificados com granulometria idêntica à produção “*in situ*”, ou seja, após a primeira mistura do betume puro com o pó de borracha num primeiro depósito, esta passa por um moinho que tritura a borracha em dimensões mais pequenas para posterior passagem para um segundo depósito. O objectivo desta trituração é diminuir o tamanho das partículas de borracha para que estas se dissolvam mais rapidamente no betume (Vicente, 2006).

PROBIGALP

A Probigalp foi pioneira na produção das três gamas de betumes borracha já referenciados (baixo, médio e alto teor). Os grandes objectivos no desenvolvimento destes tipos de BMB eram principalmente a redução do ruído em zonas urbanas e o melhoramento da drenagem de águas dos pavimentos.

Os betumes de borracha com baixo teor de granulado de borracha (BBB), são betumes modificados fabricados com uma percentagem de borracha igual ou inferior a 8% em relação à massa total do ligante e apresentam uma baixa viscosidade.

Os betumes de borracha com médio teor de borracha (BBM), são betumes modificados com uma percentagem de borracha que pode variar entre os 10 e 14% em relação à massa total do ligante e são betumes de média viscosidade. Ainda dentro desta gama BBM fazem parte os BBM Dreno que são betumes específicos para misturas drenantes.

Os betumes de borracha com alto teor de granulado de borracha (BBA), são betumes modificados fabricados com uma percentagem de borracha igual ou superior a 18% em relação à massa total do ligante e apresentam uma alta viscosidade.



Figura 3. 16 - Exemplo de camada de desgaste com BMB com alta percentagem de borracha (Probigalp, 2011)

É utilizada também a membrana SAM/SAMI referida anteriormente. Segundo a Probigalp, trata-se de um revestimento superficial com utilização do ligante modificado com borracha Viambiente BBA- Betume borracha de alto teor. O ligante neste tipo de revestimentos é utilizado a temperaturas na ordem dos 180 °C. A elevada flexibilidade deste tipo de revestimento confere uma elevada resistência à fissuração. Esta propriedade, aliada à impermeabilização da superfície, garante ao pavimento uma durabilidade elevada. Podem ser usadas como camada intermédia ou final.

CEPSA

A Cepsa produz betumes modificados nas suas refinarias, ou seja, utiliza médias e baixas percentagens de borracha, proveniente, esta do método mecânico. Com a produção em refinarias os betumes obtidos são mais homogêneos do que os produzidos *in situ*. Segundo as fichas técnicas da empresa (Cepsa, 2010) os betumes modificados usados são de dois tipos, o primeiro designado de BMB-2 que tem como principais aplicações as misturas de módulo elevado para reforços, misturas convencionais e drenantes em zonas com elevada temperatura e em pavimentos cujo objectivo é não formação de rodeiras. O segundo tipo de betume modificado é designado por BMB-3b que tem como principais aplicações as misturas convencionais, drenantes e misturas descontínuas para camadas de desgaste com categoria de tráfego pesado T0 a T2. Ambos os betumes modificados apresentam um comportamento semelhante ao correspondente betume modificado com polímeros e as suas características são similares, apresentando maior viscosidade.

Nestas misturas para além da incorporação da borracha e do betume, são misturadas outras matérias-primas como óleos compatibilizadores, aditivos e polímeros químicos (Vicente, 2006).

REPSOL

Os betumes com alta percentagem de borracha (18 a 22%) não são estáveis ao armazenamento, daí a Repsol ter optado pelo desenvolvimento dos betumes modificados com granulado de borracha com baixo e médio teor de borracha. Estes betumes podem ser fornecidos a partir duma fábrica tradicional de betumes modificados e serem armazenados nos tanques da central do empreiteiro, sem redução das características.

No início da última década a REPSOL começou a desenvolver estudos sobre estes betumes modificados com baixo (em Espanha denominados de betumes melhorados) e médio teor de borracha (em Espanha denominados de betumes modificados) segundo a normativa técnica de estradas de Espanha (PG-3), de forma a conciliar vários requisitos como, produção por via húmida, produção em fábrica e o produto final estável ao armazenamento (Lucas *et al.*, 2008).

Segundo a REPSOL existem algumas vantagens e desvantagens da produção dos BMB em fábrica (*Terminal Blend*), como por exemplo:

Não há movimentação de equipamentos de modificação dos betumes, para as centrais dos betuminosos, evitando com isso tempos de montagem e ocupação de espaço na zona da central. O BMB é fornecido directamente da cisterna de transporte para os tanques de armazenamento da central, devendo estes ter sistemas de agitação para armazenamentos mais prolongados. Fornecimento mais versátil para obras de pequena dimensão, no que diz respeito ao nível de quantidades e na mobilização de equipamentos específicos. É realizado um acompanhamento mais rigoroso de todos os passos da fabricação.

A desvantagem da produção de betumes-borracha em fábrica é a sua sensibilidade à temperatura, ou seja, o aquecimento do BMB nos tanques deverá ser cuidadoso e para tal tem que haver um controlo da temperatura para evitar a calcinação do negro de fumo da borracha. Essa temperatura não deverá ser superior a 185 °C.

Os betumes melhorados têm percentagem de borracha inferior a 8% e podem ser aplicados em misturas para camadas inferiores (intermédia ou base) de pavimentos das categorias de tráfego pesado a T41 e nas camadas superiores (desgaste) nas categorias de tráfego pesado de T1 a T4 que são a maioria dos pavimentos. Esta reduzida percentagem de borracha no betume ajuda a melhorar as características das misturas modificadas em relação às misturas convencionais, no entanto estes betumes de baixo teor não devem ser entendidos como um substituto dos betumes modificados tradicionais pois as suas características são inferiores às destes (Repsol, 2007). Em Portugal estes betumes estão de acordo com a especificação estabelecida para os betumes de borracha de baixa viscosidade (BBB) pela, Estradas de Portugal no Caderno de Encargos Tipo.

Os betumes modificados têm percentagens de borracha de 8 a 15% em relação à massa total do ligante. Segundo a normativa técnica de estradas de Espanha (PG-3) há uma separação dos diferentes tipos de betume modificados. Por um lado existem os betumes pouco elastoméricos referenciados como BM-1, BM-2 e BM-3a, ou seja, são betumes modificados apenas com borracha e apresentam ductilidades e recuperações elásticas relativamente baixas. Por outro lado existem os betumes, nos quais, para além do pó de borracha são adicionados polímeros elastoméricos com o objectivo de obter melhores valores de ductilidade e recuperação elástica. São referenciados como BM-3b, BM-3c, BM-4 e BM-5 (Nunes *et al.*, 2007).

Estes betumes são, em Espanha, denominados de *betunes modificados com caúcho* assumindo a nomenclatura BMC. O Caderno de Encargos Tipo da, Estradas de Portugal, denomina estes produtos de betumes de borracha de média viscosidade (BBM), especificando dois produtos com penetração 35/50 e 50/70 que correspondem respectivamente com BMC-2 e BMC-3a da nomenclatura espanhola.

Mais recentemente a REPSOL tem desenvolvido estudos para a modificação de betumes em fábrica, com alta percentagem de granulado de borracha com valores entre os 18 e 22% de borracha.

3.5.4 Produção das misturas com BMB em Portugal

A aplicação da borracha reciclada de pneus em misturas betuminosas em Portugal teve início há pouco mais de 11 anos, sendo feitos estudos e ensaios laboratoriais com o objectivo de evoluir os processos de produção e formulação das mesmas, assim como os seus resultados.

Nas misturas betuminosas modificadas com borracha podem existir três tipos de estruturas granulométricas, as misturas do tipo “Contínua” (*dense graded*), “Aberta” (*open graded*) e “Rugosa” (*gap graded*), sendo as duas últimas consideradas descontínuas.

As misturas mais utilizadas em Portugal e referidas no Caderno de Encargos da, Estradas de Portugal, são as do tipo “Aberta” que possuem em geral 9 a 10% de betume e do tipo “Rugosa” que têm a percentagem de betume a variar entre a 7,5 e 8,5%.

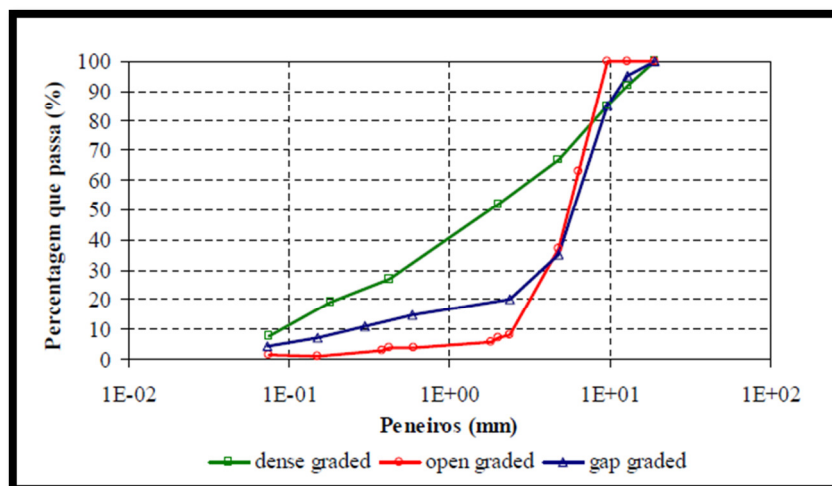


Figura 3. 17 - Curvas granulométricas tipo utilizadas em misturas betuminosas (Fontes, 2009)

Na mistura betuminosa aberta (*open graded*), predomina o elevado teor de betume e a elevada fracção de agregados grossos, sendo portanto muito reduzida a fracção de agregados finos (Fig. 3.17). Alguns dos agregados mais representativos neste tipo de misturas são os granitos, os dioritos e os basaltos. Estas misturas são utilizadas nas camadas de desgaste e têm um elevado volume de vazios o que resulta numa boa permeabilidade e num rápido escoamento das águas, reduzindo o risco de hidroplanagem.

A sua aplicação incide principalmente em pavimentos novos ou em obras de conservação, onde se torne necessário intervir ao nível da reabilitação das características de superfície e também de regularidade (características funcionais), em pavimentos flexíveis ou em pavimentos de betão (Recipav, 2010).

Foi criado um documento de aplicação no LNEC, definindo as características e estabelecendo as condições de execução e de utilização em pavimentos rodoviários e aeroportuários deste tipo de misturas abertas, sendo o ligante modificado produzido pela empresa Recipav. Segundo o documento, o fabrico destas misturas passa primeiro pela alteração do betume, que é previamente aquecido a uma temperatura aproximada de 190°C, e introduzido num misturador. De seguida procede-se à introdução da borracha reciclada de pneus moída, de forma contínua e de acordo com a percentagem estabelecida no estudo de formulação. No misturador inicia-se a reacção do betume com a borracha, a qual tem continuação na cisterna de armazenamento do BMB, para onde a mistura de betume e de borracha é seguidamente transferida. Para concluir o processo de modificação do betume, a mistura de betume e de borracha permanece na cisterna de armazenamento durante um período, geralmente entre 45 e 150 minutos, a uma temperatura de 185°C, em permanente agitação e com controlo da temperatura. Uma vez produzido o BMB, este é transferido para a unidade de mistura dos materiais da central de fabrico de misturas betuminosas a quente donde resulta a mistura final, no caso MBA-BMB (LNEC, 2006).

A mistura do tipo rugosa (*gap graded*) apresenta uma granulometria descontínua, ou seja, existe a falta de determinadas fracções de agregados finos (Fig. 3.17). Os agregados mais representativos neste tipo de misturas são os granitos, os dioritos e o seixo britado. Estas misturas podem ser usadas não só nas camadas de desgaste mas também nas camadas de regularização e de base, tendo funções estruturais e funcionais, como por exemplo redução do atrito pneu/pavimento e redução de ruído. Tem como vantagens a melhoria do desempenho às deformações permanentes, possui elevada resistência à fadiga e propagação de fendas. Tal como para as misturas betuminosas modificadas abertas, foi criado um documento de aplicação para as MBR-BMB sendo o processo de fabrico idêntico.

O quadro seguinte mostra as principais características das misturas MBA e MBR de acordo com documentos de aplicação do LNEC para estas misturas, com betumes 35/50.

Quadro 3. 6 - Características das misturas MBA e MBR com BMB (LNEC, 2006 e 2008)

Mistura	Módulo de Deformabilidade (MPa) Temp. 20°C Frequência: 10 Hz	Porosidade (%)	Teor Volumétrico em betume (%)	Dimensão Máxima do agregado (mm)	Percentagem de BMB relativa à massa total da mistura (%)	Ligante (% de borracha relativa à massa total de BMB)
MBA-BMB	1500 - 2500	12 – 18	≥ 19,2	10	9 – 10	18 -22
MBR-BMB	3000 - 4500	3,5 – 6,5	17,5	14	8 - 9	18 - 22

4. Avaliação do comportamento das misturas betuminosas com BMB em Portugal

4.1. Introdução

Com a utilização das misturas betuminosas modificadas com borracha durante 11 anos, muitos estudos e ensaios foram realizados para caracterizar o comportamento das mesmas. Esses ensaios ajudaram a obter resultados em relação às principais características das misturas betuminosas como, a resistência à fadiga, resistência às deformações permanentes, avaliação do ruído, avaliação à sensibilidade da água, a resistência ao deslizamento (atrito) e avaliação da textura superficial. Resultados esses que serviram de comparação com outro tipo de misturas betuminosas. Mostra-se de seguida alguns dos principais estudos realizados desde 1999 até aos dias de hoje. Para tal fez-se uma breve descrição das características dos materiais a usar, métodos de formulação e fabrico dos betumes e por fim a apresentação dos resultados dos mesmos.

No quadro seguinte são referenciados os valores nominais das características funcionais e estruturais para as misturas abertas (MBA-BMB) e rugosas (MBR-BMB), presentes nos documentos de aplicação, sendo válidas apenas para as misturas produzidas com betumes da RECIPAV.

Quadro 4. 1 - Valores Nominais das características funcionais e estruturais para as misturas MBA-BMB e MBR-BMB (LNEC, 2006 e 2008)

Características		Ensaio	Valores nominais p/ betume 35/50	
			MBA	MBR
Estruturais	Módulo de deformabilidade	EN 12697-26:2004 Flexão em 4 pontos Temperatura: 20 °C Freq. de carregamento: 10Hz	1500 - 2500	3000 - 4500
	Resistência à Fadiga	EN 12697-24:2004 Flexão em 4 pontos Temperatura: 20 °C Freq. de carregamento: 10Hz	≥ 450	≥ 200
		AASHTO TP8-94 Flexão em 4 pontos Temperatura: 20 °C Freq. de carregamento: 10Hz	-	≥ 400
	Deformações Permanentes	NLT-173/84 Deformação final, 120 min Temperatura: 60 °C	≤ 5 mm	-
		NLT-173/84 Velocidade deformação entre 105 e 120 min Temperatura: 60 °C	≤ 12 µm/min	≤ 10 µm/min
		EN 12697-22: 2003 Ensaio de Pista, Equipamento Pequeno, Procedimento B Temperatura: 60 °C	-	- Taxa de deformação: ≤ 0,08 mm/10 ³ ciclos de carga - % de profundidade de rodeira: ≤ 6
Funcionais	Resistência ao Atrito	BS 7941-2: 2000 (GRIP-TESTER) Velocidade: 50 km/h	≥ 0,75 (Grip Number)	≥ 0,65 (Grip Number)
		EN 13036- 4:2007	-	≥ 70 PTV
	Profundidade de Textura	EN 13036-1: 2001	≥ 1,1 mm	≥ 1,0 mm

4.2. Resistência à Fadiga e Módulo de deformabilidade

Ensaio de caracterização para uma mistura betuminosa com BMB (Quaresma *et al.*, 1999)

O primeiro ensaio em Portugal para caracterização de misturas betuminosas com betumes modificados com borracha foi realizado no laboratório do LNEC em 1999. O objectivo deste ensaio foi caracterizar este tipo de misturas para posterior aplicação nas Estradas Nacionais 104 e 105. Foi feita a comparação de uma mistura convencional (macadame betuminoso) com betume do tipo 35/50 e de uma mistura betuminosa do tipo descontínua rugosa (*gap graded*) onde o betume 35/50 foi modificado com adição de 20% borracha reciclada num misturador rotativo, à temperatura de 180°C com um tempo de reacção de 60 minutos. Propôs-se então a avaliação ao módulo de deformabilidade e resistência à fadiga, ambas seguindo a norma AASHTO TP8-94 das vigas preparadas para ensaio.

Quadro 4. 2 - Composição granulométrica das misturas betuminosas em estudo (Quaresma *et al.*, 1999)

Fracção Granulométrica	Mistura Betuminosa	
	com BMB (betume-borracha)	Com o betume 35/50
Brita 2 – 15/25 mm	4%	40%
Brita 1 – 5/15 mm	68%	20%
Pó de Pedra – 0/5 mm	26%	38%
Cal	2%	2%

Para ambas as misturas foram usados os mesmos tipos de agregados, sendo diferentes as percentagens usadas para cada uma das misturas, como mostra o quadro 4.2. As temperaturas de mistura e compactação foram, no caso do betume com borracha 177 °C e 155 °C, respectivamente e no betume convencional 158°C e 147°C, respectivamente.

O cálculo do módulo de deformabilidade consistiu na aplicação de uma deformação (0,015 mm) através de uma força aplicada em dois pontos da viga simplesmente apoiada, durante 100 ciclos de carga com frequências de 5 Hz e 10 Hz. As vigas foram previamente sujeitas a um aquecimento (85 °C) durante 5 dias de forma a produzir um envelhecimento mais acelerado. Os ensaios foram realizados a uma temperatura média de 22 °C no interior da viga.

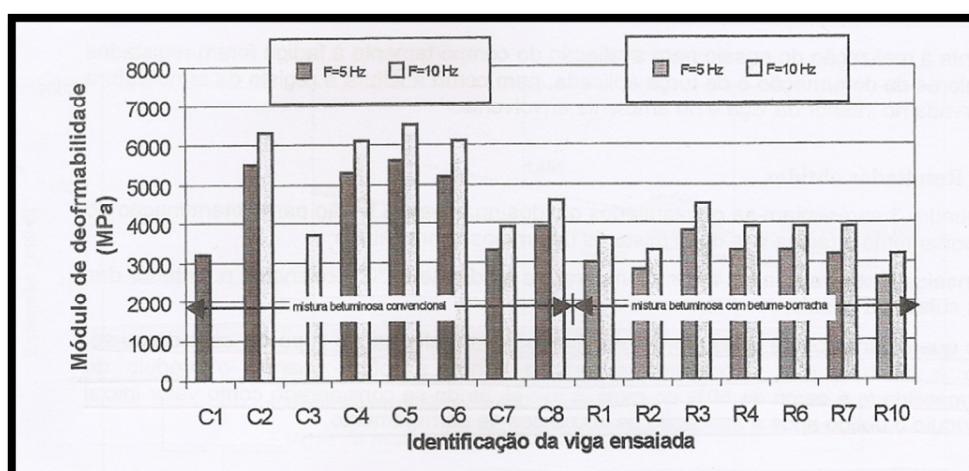


Figura 4. 1 - Módulos de deformabilidade para frequências de 5 e 10 Hz (Quaresma *et al.*, 1999)

Da análise dos valores (Fig. 4.1) chegaram-se a algumas conclusões. O módulo de deformabilidade para a mistura betuminosa modificada com BMB apresentou em média valores inferiores aos da mistura convencional, para ambas as frequências. No entanto os valores para a mistura convencional apresentaram uma maior dispersão. Conclui-se também que os resultados para a frequência de 5 Hz são inferiores aos obtidos para frequência de 10 Hz para as duas misturas.

Os ensaios de resistência à fadiga consistiram na aplicação de uma deformação imposta a uma viga simplesmente apoiada, com aplicação de um deslocamento (0,015 mm) e com frequência de 10 Hz.

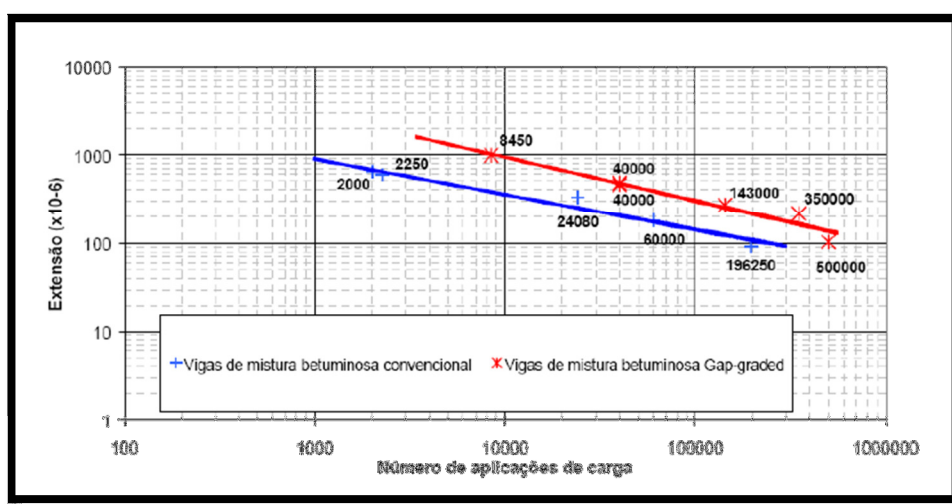


Figura 4. 2 - Leis de fadiga obtidas para as duas misturas em estudo (Quaresma *et al.*, 1999)

No caso dos ensaios que são sujeitos a uma deformação imposta considera-se que o provete de ensaio atinge a rotura quando o módulo de deformabilidade é cerca de 50% do módulo inicial. Foi o caso deste ensaio, tendo-se considerado como valor inicial do módulo o obtido após a aplicação de 100 ciclos de carregamento.

Dos resultados obtidos verificou-se que a resistência à fadiga para a mistura betuminosa modificada com betume-borracha apresentou um melhor comportamento relativamente à mistura com betume 35/50. O número de aplicações de carga para a mistura com BMB é cerca de 3 a 5 vezes superior à mistura convencional, para valores de extensão entre 100 e 300x10⁻⁶. Para valores acima dos 300x10⁻⁶ os valores da resistência à fadiga para a mistura com BMB são muito superiores verificando-se um número de aplicações de carga 5 a 10 vezes superior à mistura convencional (Fig. 4.2).

Estudo para a reabilitação dos troços das EENN 104 e 105 (Antunes *et al.*, 2000)

Em 1999 o Instituto para a Conservação e Exploração da Rede Rodoviária (ICERR) aprovou a utilização das misturas betuminosas com ligante modificado com borracha na reabilitação de dois troços das Estradas Nacionais 104 e 105, numa extensão de 30 km, tornando-se a primeira obra realizada em Portugal com este tipo de mistura.

Antes das obras de reabilitação dos referidos pavimentos flexíveis, estes apresentavam algumas anomalias importantes relativamente ao estado da superfície, destacando-se a ocorrência de fendilhamento tipo pele de crocodilo em extensas áreas, bem como a ocorrência de deformações permanentes localizadas.

A solução para a reabilitação passou por aplicar uma camada de regularização com espessura nominal entre 7 e 9 cm e depois uma camada de desgaste em mistura betuminosa descontínua do tipo rugosa com betume-borracha designando-se, Betão Betuminoso com Borracha (BBB) com uma espessura nominal de 6 cm.

O fabrico do betume-borracha utilizado na mistura betuminosa foi realizado numa central contínua, à qual se fez uma ligação entre a cisterna de armazenamento do betume base e do misturador da central, de forma a modificar-se o betume por adição de borracha (método por via húmida). A digestão (reacção do betume com a borracha) foi efectuada à temperatura de 180°C durante 45 minutos. As percentagens de betume e borracha foram de 82 e 18% respectivamente.

A mistura continha agregados de origem granítica de granulometria 0/14 mm, sendo utilizada uma percentagem do ligante BMB na ordem dos 7%. A mistura modificada foi temporariamente armazenada para posterior transporte para obra

Foram também realizados alguns estudos laboratoriais com o objectivo de caracterizar as misturas aplicadas em termos de resistência à fadiga e deformações permanentes. Para a produção do betume-borracha em laboratório misturou-se o betume base e a borracha à temperatura de 180°C e utilizou-se uma haste vertical com rotação de 1200 rpm de forma a ter um processo de digestão semelhante ao da obra (Fig. 4.3). Com o objectivo de avaliar as propriedades do betume-borracha variou-se o tempo de digestão entre um mínimo de 45 minutos e um máximo de 5 h e 30 minutos. A grande razão desta variação do tempo de digestão deveu-se ao facto de em obra o tempo de 45 minutos estabelecido poder ser ultrapassado em muitos dos casos.



Figura 4. 3 - Produção de BMB em laboratório (Antunes *et al.*, 2000)

Submeteram-se os betumes, base e de borracha a diversos ensaios de forma a determinar as suas características, onde se conclui que o betume base apresentou o valor de penetração a 25 °C de 54×10^{-1} mm, valor este superior aos obtidos para os diversos provetes do betume modificado com borracha que se situaram entre os 30 e 40×10^{-1} mm. Outros resultados obtidos foram a temperatura de amolecimento, que para o betume base foi de 50,8 °C e para os betumes-borracha a variar entre 66 e 69 °C; a resiliência do betume-borracha teve valores na ordem dos 24 a 32%.

Com os resultados destes ensaios procedeu-se à caracterização mecânica das misturas betuminosas. Analisou-se então a resistência à fadiga destas misturas betuminosas com borracha.

Já com alguns troços pavimentados com a camada de desgaste fizeram-se ensaios de resistência à fadiga, realizados no LNEC, para os quais foram utilizados como provetes, 6 vigas (V1, V2, V3, V4, V5, V6) extraídas dessa mesma camada de desgaste do pavimento em obra, com comprimentos de 60 cm, e secção transversal 9x9 cm². Duas destas vigas foram sujeitas a um processo de envelhecimento acelerado em estufa (V5 e V6).

Os ensaios usados para avaliar a resistência à fadiga foram os ensaios à flexão simples em extensão controlada, que consistiram na aplicação de um carregamento sinusoidal com uma frequência de 10 Hz, com base na norma de ensaio AASHTO TP8-94. Os valores da extensão variaram entre 230 e 690 μ_m e a temperatura de ensaio foi de 22 °C. Antes da concretização dos ensaios foram ainda calculados módulos de deformabilidade em flexão dos provetes, também à temperatura de 22 °C, obtendo-se valores aproximadamente de 3000 Mpa para as vigas não submetidas a envelhecimento e de 4000 Mpa para as que foram submetidas a envelhecimento.

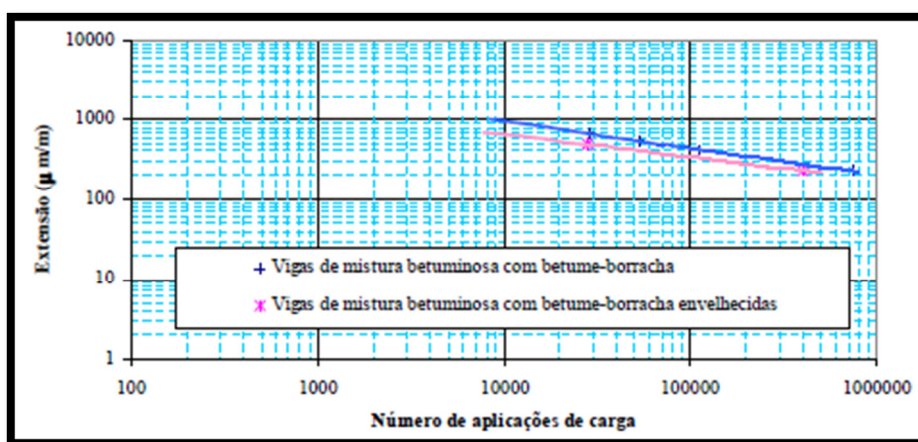


Figura 4. 4 - Leis de fadiga para amostras retiradas de obra (Antunes *et al.*, 2000)

Dos ensaios à flexão obtiveram-se os resultados apresentados na Fig. 4.4 com a representação gráfica da lei de vida à fadiga. Pode observar-se que a resistência à fadiga é muito semelhante para os provetes submetidos ao envelhecimento e os restantes. Concluiu-se que as misturas betuminosas com borracha não são muito sensíveis ao envelhecimento apesar do aumento do módulo de deformabilidade.

Concluiu-se também, comparativamente com os resultados obtidos nos provetes das misturas betuminosas com borracha moldados em laboratório, que os resultados também são semelhantes.

Estudo do troço da EN 104 após 6 anos de serviço (Baptista *et al.*, 2006)

Com a estrada nacional 104 reabilitada e em serviço decidiu-se em 2005/2006, sensivelmente 6 anos depois, fazer um novo estudo da resistência à fadiga da camada de desgaste do pavimento, podendo assim serem feitas comparações com os resultados obtidos dos provetes extraídos no início da obra imediatamente após a sua aplicação.

A MBR-BMB aplicada foi fabricada por via húmida, numa central contínua devidamente adaptada ao fabrico do BMB, utilizando uma mistura de agregados de origem granítica de granulometria descontínua 0/14 mm e uma percentagem de ligante de 7%. As percentagens ponderais de betume base e de borracha utilizadas no fabrico do BMB foram de 82% e de 18%, respectivamente.



Figura 4. 5 - Provates retirados após seis anos de serviço (Baptista *et al.*, 2006)

Nas mesmas condições que os primeiros ensaios, comparou-se os resultados do ensaio à flexão simples em quatro pontos, segundo a norma americana AASHTO TP8-94, para os provates retirados após seis anos (Fig. 4.5).

O quadro 4.3 apresenta as características com valores médios de cada um dos tipos de vigas ensaiadas nestes estudos. A primeira referente ao ensaio laboratorial realizado antes do início do projecto em 1999, como foi referida anteriormente. A segunda e terceira são as características referentes às vigas ensaiadas em 2000 logo após a reabilitação da estrada, umas submetidas a envelhecimento e outras não. A última refere-se às vigas ensaiadas para este estudo realizado 6 anos depois.

Quadro 4. 3 - Características dos diferentes provates ensaiados (Baptista *et al.*, 2006)

Identificação	Local e data de recolha/preparação de vigas	Ligante utilizado no fabrico das misturas	Dimensões médias		Baridade média (g/cm ³)	Tratamento prévio	Módulo de deformabilidade, 20 °C (MPa)
			Secção (cm ²)	Comprimento (cm)			
VL B35/50 Env.	Laboratório; 1999	B35/50	10x10	50	2,14	Vigas submetidas a envelhecimento acelerado	3500
VC (EN104; 2000) BMB	EN104; 2000	BMB	9x9	60	2,28	-	3200
VC (EN104; 2000) BMB Env.	EN104; 2000	BMB	9x9	60	2,28	Vigas submetidas a envelhecimento acelerado	4300
VC (EN104; 2005) BMB 6 anos	EN104; 2005	BMB	6x6	50	2,26	-	6700

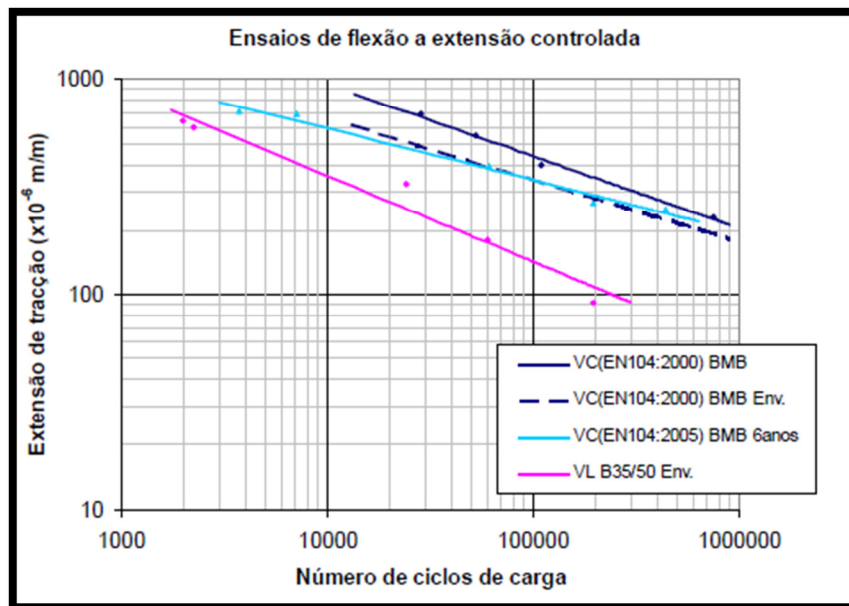


Figura 4. 6 - Resistência à fadiga (Baptista *et al.*, 2006)

A Fig. 4.6, representa as leis de fadiga, verificando-se que:

- As amostras das misturas recolhidas em 2000 e submetidas a envelhecimento acelerado em laboratório (VC (EN 104:2000) BMB Env), apresentam resultados muito semelhantes às amostras recolhidas após 6 anos (VC (EN 104:2005) BMB 6 anos). Conclui-se que o método de envelhecimento em laboratório é bastante eficaz produzindo adequadamente o envelhecimento das misturas.
- Chegou-se também à conclusão que os valores da resistência à fadiga são muito próximos quer para os provetes em misturas (VC (EN 104:2000) BMB Env), quer para os provetes em misturas (VC (EN 104:2005) BMB 6 anos), para níveis de extensão baixos.
- Comparando as misturas produzidas com BMB, quer envelhecidas ou não, apresentaram resultados bastante melhores do que misturas produzidas em laboratório com betumes convencionais envelhecidos, no caso betumes 35/50.

Actualmente e após 11 anos de serviço pode observar-se através da Fig. 4.7 o bom estado de conservação do pavimento, da EN 104, com misturas betuminosas modificadas com borracha em relação ao pavimento convencional.



Figura 4. 7 - EN 104, pavimento modificado e convencional (Recipav, 2009)

Estudo da reabilitação do pavimento do lanço CRIL-Loures da A8 (Pestana *et al.*, 2006)

No ano de 2001 a Auto-Estradas do Atlântico decidiu fazer a reabilitação estrutural do pavimento no lanço CRIL-Loures da A8 e para tal utilizou duas soluções distintas. No sentido Norte-Sul foi utilizada uma mistura betuminosa aberta, modificada com betume-borracha (BMB) tendo sido aplicada com 2 cm de espessura. No sentido Sul-Norte utilizou-se uma mistura betuminosa (betão betuminoso) com betume modificado com polímeros (SBS) e aplicado com 5 cm de espessura.

Após 4 anos de serviço decidiu-se realizar um estudo para verificar as características mecânicas das misturas betuminosas aplicadas. Para tal foram retiradas lajes dos trechos experimentais e dois dos ensaios realizados foram o de módulo de deformabilidade e resistência à fadiga.

O material utilizado nas misturas betuminosas foi formulado através do ensaio de Marshall que levou aos resultados apresentados no quadro 4.4. Na mistura com BMB apenas o material retirado da berma apresenta mais ligante do que o estudo de formulação correspondente, o que levará a melhores resultados de resistência à fadiga e menores módulos de deformabilidade quando comparado com a mistura da faixa de rodagem. Em relação à mistura com SBS apresenta uma percentagem de betume superior em relação ao seu estudo de formulação. Quanto à porosidade a mistura com BMB é inferior em cerca de 50% em relação à sua formulação, passando de uma mistura aberta (formulação) para uma mistura fechada (*in situ*). Por fim a mistura com SBS apresenta valores de porosidade superiores aos da sua formulação logo é de esperar valores menores para o módulo de deformabilidade e resistência à fadiga.

Quadro 4. 4 - Características do betume (Pestana *et al.*, 2006)

Mistura	Local	Porosidade (%)		% Betume	
		Formulação	Medido <i>in situ</i>	Formulação	Medido <i>in situ</i>
SBS	Berma	4,2	5,8	5,1	6,3
	Faixa		4,4		6,4
BMB	Berma	15,0	7,7	9,0	10,2
	Faixa		7,1		8,9

No que diz respeito à granulometria a mistura SBS apresentou valores dentro do fuso médio especificado (Fig. 4.8). A mistura BMB apresentou valores abaixo do limite inferior do fuso para agregados finos e acima para agregados grossos (Fig. 4.9).

Para a obtenção dos valores do módulo de deformabilidade recorreu-se ao ensaio de flexão em 4 pontos com carregamento sinusoidal repetido, sobre provetes, extraídos da faixa e da berma, com dimensões de 5,1 x 6,3 x 38,0 cm³ de acordo com a norma AASHTO TP8-94 tendo-se aplicado uma extensão máxima de tracção na base dos provetes de 100 x 10⁻⁶. No quadro 4.5 apresentam-se os resultados obtidos para diversas frequências, à temperatura de 20 °C, do módulo de deformabilidade e ângulo de fase.

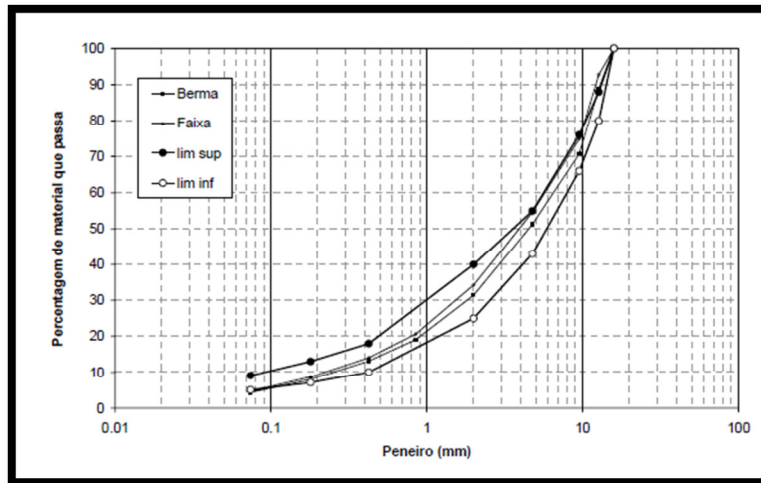


Figura 4. 8 - Curva granulométrica das misturas SBS (Pestana *et al.*, 2006)

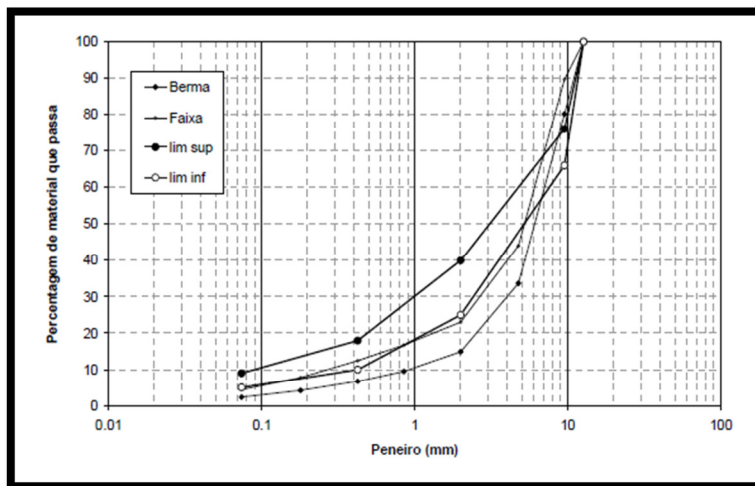


Figura 4. 9 - Curva granulométrica das misturas BMB (Pestana *et al.*, 2006)

Para as misturas com betumes modificados com polímeros (SBS) os valores do módulo de deformabilidade apresentaram valores maiores para as amostras retiradas da faixa de rodagem em relação às retiradas da berma. Esta diferença deve-se à menor porosidade na faixa de rodagem o que faz com que apresente valores maiores do módulo de deformabilidade.

Nas misturas com betumes modificados com borracha (BMB) aconteceu precisamente o contrário, os valores do módulo de deformabilidade são maiores para as amostras retiradas da berma embora com uma diferença de valores reduzidas. Este facto deveu-se à baixa porosidade nas amostras apresentadas, tornando esta mistura fechada comparativamente à formulação das mesmas em que se considerava aberta. Na faixa de rodagem a presença de mais finos e a reduzida percentagem de betume foi outra das razões para os valores apresentados. Tanto na berma como na faixa de rodagem os valores apresentados consideraram-se ainda assim dentro dos valores normais para a mistura.

Quadro 4. 5 - Módulo de deformabilidade e ângulo de fase (Pestana, 2006)

Mistura	Frequência (Hz)	Módulo de deformabilidade (MPa)	Ângulo de fase (graus)	Mistura	Frequência (Hz)	Módulo de deformabilidade (MPa)	Ângulo de fase (graus)
SBS berma	10	7369	14,0	BMB berma	10	3218	18,2
	5	6535	16,8		5	2993	18,8
	2	5427	20,5		2	2488	20,5
	1	4625	23,2		1	2144	21,7
	0,5	3877	25,7		0,5	1840	22,9
	0,2	2998	29,1		0,2	1492	24,5
	0,1	2434	30,8		0,1	1247	25,9
SBS Faixa de rodagem	10	8881	11,9	BMB Faixa de rodagem	10	2653	15,6
	5	8006	14,4		5	2470	16,4
	2	6816	17,6		2	2168	18,0
	1	5948	19,9		1	1881	19,4
	0,5	5116	22,3		0,5	1620	20,6
	0,2	4075	25,4		0,2	1379	22,3
	0,1	3349	28,2		0,1	1158	23,8

Foi ainda apresentado o resultado para os ângulos de fase das misturas. A mistura SBS houve uma redução do ângulo de fase da mistura da faixa de rodagem em relação à da berma. Na mistura BMB concluiu-se que há uma menor influência da frequência da aplicação de cargas no ângulo de fase o que resulta uma maior resistência à deformação permanente para cargas mais lentas.

Outro dos ensaios realizados foi a resistência à fadiga através do ensaio de flexão em 4 pontos com carregamento sinusoidal repetido, sobre provetes, extraídos da faixa e da berma, com dimensão de $5,1 \times 6,3 \times 38,0 \text{ cm}^3$ de acordo com a norma AASHTO TP8-94 conduzidos a 20°C com frequência de aplicação de cargas de 10 Hz. Foram ensaiados dois níveis de extensão, 300×10^{-6} e 700×10^{-6} .

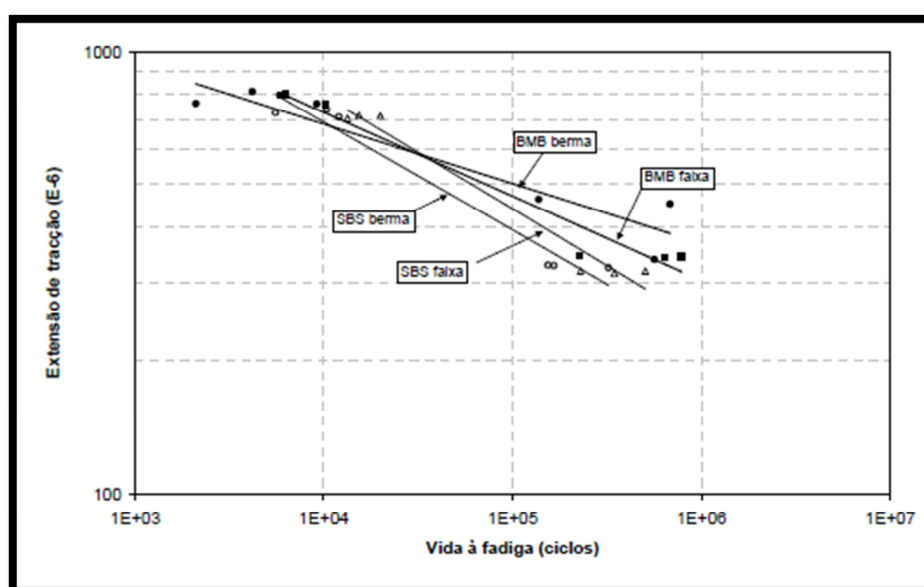


Figura 4. 10 - Leis de Fadiga (Pestana *et al.*, 2006)

Após a realização dos ensaios obtiveram-se as leis de fadiga (Fig. 4.10) onde se conclui que, para a mistura SBS o material da faixa de rodagem tem maior resistência à fadiga quando comparada com a da berma. Isto é consequência da menor porosidade na faixa de rodagem o que leva a um maior módulo de deformabilidade, como já foi referido atrás.

Em relação à mistura BMB houve uma diferença em relação às amostras retiradas da faixa de rodagem e da berma. Para níveis de extensão mais baixos, que simulam as extensões no pavimento quando se dá a passagem de veículos pesados, verificou-se uma maior resistência do material retirado da berma relativamente à faixa de rodagem. Isto deveu-se, à mistura retirada da faixa de rodagem ter uma percentagem de betume inferior ao da berma e também uma elevada percentagem de finos.

Estudo do desempenho de misturas betuminosas abertas e fechadas com betume modificado com baixa percentagem de borracha (Pais *et al.*, 2008).

No início do ano de 2008 realizou-se um estudo em que permitiu comparar o desempenho da resistência à fadiga de misturas betuminosas abertas e fechadas com betume modificado com borracha e misturas com betume convencional, ambas com características de desgaste. Foram feitos também ensaios para o cálculo do módulo de deformabilidade das misturas.

Quadro 4. 6 - Fuso granulométrico das misturas em estudo (Pais *et al.*, 2008)

Mistura	Abertura das malhas	(mm)	12.5	10	4	2	0.5	0.063
Aberta	Fuso granulométrico	superior	100	97	27	22	16	7
		inferior	100	75	14	11	8	5
	Curva final		100	87.7	22.6	15.5	10.4	5.8
Fechada	Fuso granulométrico	superior	100	97	38	32	23	9
		inferior	100	75	23	18	11	7
	Curva final		100	89.5	32.2	23.1	15.0	7.7

Para a formulação das misturas betuminosas recorreu-se ao método de Marshall onde se avaliou a estabilidade, a baridade e a porosidade das misturas para diferentes percentagens de betume conforme indicam as Figs. 4.11, 4.12 e 4.13, respectivamente. As misturas foram fabricadas com o betume modificado Polybetume C2, proveniente da empresa Probigalp, sendo estas misturas compactadas em laboratório.

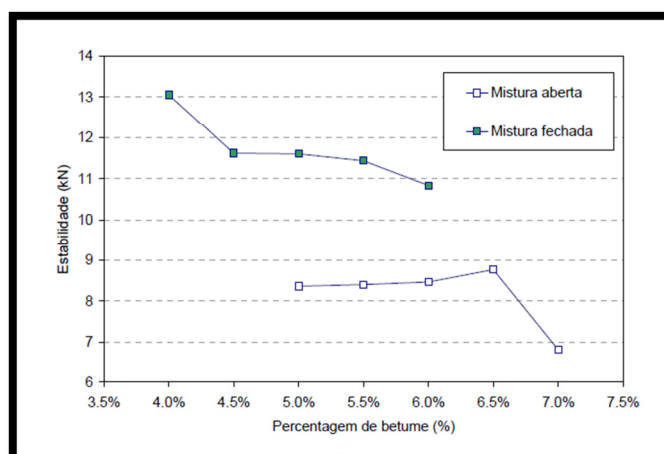


Figura 4. 11 - Estabilidade das misturas modificadas com BMB em estudo (Pais *et al.*, 2008)

Analisando a estabilidade da formulação Marshall concluiu-se que as misturas betuminosas modificadas com baixas percentagens de borracha apresentavam pouca variação com da estabilidade em relação à percentagem de betume usado.

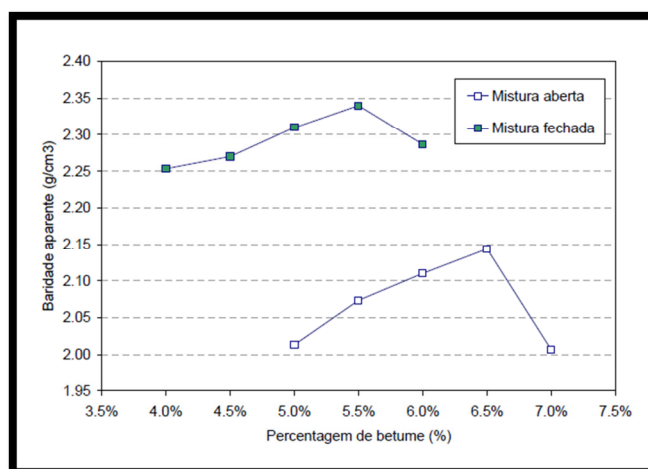


Figura 4. 12 - Baridade aparente das misturas modificadas com BMB em estudo (Pais *et al.*, 2008)

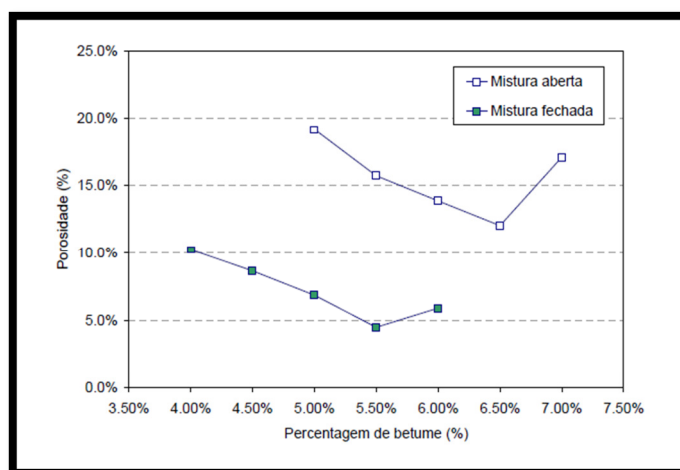


Figura 4. 13 - Evolução da porosidade das misturas com BMB em estudo (Pais *et al.*, 2008)

A evolução da baridade dos provetes Marshall e, ao contrário do que aconteceu com a estabilidade, a baridade aparente é influenciada pela percentagem de betume das misturas. Em relação à porosidade dos provetes Marshall das misturas em estudo cumpriram com as exigências destas, nomeadamente porosidades superiores a 4% para a mistura fechada e de 12% para a mistura aberta. Definiu-se as percentagens óptimas de betume como sendo de 6,5% para a mistura betuminosa aberta e de 5,5% para a mistura betuminosa fechada.

A mistura betuminosa convencional utilizada para comparação neste estudo teve como características, uma percentagem óptima de betume de 5%, uma porosidade de 4% e baridade aparente de 2,43 g/cm³. Para uma frequência de 10 Hz o módulo de deformabilidade desta mistura foi de 3500 MPa.

O módulo de deformabilidade das misturas betuminosas foi calculado através do ensaio de flexão em 4 pontos com carregamento sinusoidal repetido, sobre provetes com dimensão de 5,1 x 6,3 x

38,0 cm³ de acordo com a norma AASHTO TP8-94 conduzidos a 20°C com a frequência de aplicação de cargas de 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,2 e 0,1 Hz. A extensão máxima de tracção na base dos provetes foi de 100 x 10⁻⁶. Os resultados podem ser observados no quadro 4.7.

Quadro 4. 7 - Módulo de deformabilidade e ângulo de fase de ambas as misturas com BMB em estudo (Pais *et al.*, 2008)

Mistura	Frequência (Hz)	Módulo (MPa)	Ângulo de fase (graus)
Aberta	10	3530	26,5
	5	2880	31,2
	2	2070	37,6
	1	1551	42,4
	0,5	1107	47,1
	0,2	673	51,9
	0,1	457	54,2
Fechada	10	5723	22,2
	5	4811	26,7
	2	3629	32,8
	1	2846	37,3
	0,5	2119	42,2
	0,2	1347	47,6
	0,1	959	51,1

A mistura betuminosa com características de desgaste com betume convencional apresenta para 10 Hz um valor semelhante do módulo de deformabilidade ao da mistura betuminosa aberta com BMB.

No que diz respeito à resistência à fadiga realizou-se o ensaio de flexão em 4 pontos com carregamento sinusoidal repetido, sobre provetes com dimensão de 5,1 x 6,3 x 38,0 cm³ de acordo com a norma AASHTO TP8-94 conduzidos a 20°C com frequência de aplicação de cargas de 10 Hz. Foram ensaiados dois níveis de extensão, 300 x 10⁻⁶ e 700 x 10⁻⁶.

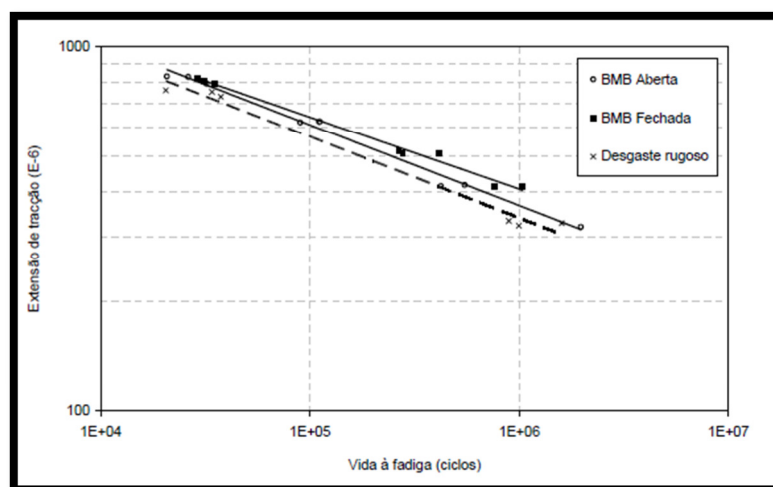


Figura 4. 14 - Lei de fadiga para as misturas em estudo (Pais *et al.*, 2008)

Avaliando os resultados (Fig. 4.14) foi possível observar que as duas misturas betuminosas modificadas apresentaram resultados muito semelhantes ao nível da resistência à fadiga, apenas se verificou um ligeira diferença para extensões mais baixas onde a mistura fechada apresenta melhor resistência à fadiga do que a mistura aberta e consequentemente que a mistura convencional.

Concluindo, as misturas com BMB apresentaram melhores resultados de resistência à fadiga do que as misturas convencionais.

Comparação da vida à fadiga entre misturas com betume modificado com borracha reciclada de pneus e convencionais, fabricadas em laboratório (Sousa *et al.*, 2004)

Numa parceria entre a Recipav, Consulpav, Universidade do Minho e o LNEC, efectuaram-se ensaios com o objectivo de comparar o comportamento da resistência à fadiga de duas misturas betuminosas, uma modificada com borracha reciclada de pneus, de granulometria descontínua (MBD-BMB) e outra, uma mistura convencional, no caso, macadame betuminoso.

Para estes ensaios foram fabricadas lajes, para posterior extracção de provetes. Essas lajes foram construídas em várias fases a fim de avaliar a repetição de resultados. Para tal foi usado na MBD-BMB um betume convencional de penetração nominal 35/50, o qual foi modificado com a adição 20% de borracha, feita num misturador rotativo à temperatura de 180°C e com um tempo de digestão de 60 minutos. O teor de betume previsto para a granulometria foi de 9%. No que diz respeito à mistura convencional, foi usado um betume de penetração nominal 35/50 e o teor de betume foi de 4,5%.

Com a mistura dos agregados aos respectivos betumes foram fabricadas as lajes e cortados os provetes prismáticos, sendo metade deles sujeitos a um processo envelhecimento que consistiu na conservação em estufa a 85°C durante 5 dias. O objectivo deste envelhecimento passou por determinar as diferenças de comportamento das misturas aplicadas após o seu fabrico e após algum tempo de serviço.

Para determinação da resistência à fadiga foram feitos ensaios de flexão aos provetes simplesmente apoiados com deformação imposta de acordo com a norma de ensaio AASHTO TP 8-94. Fizeram-se então várias comparações entre os provetes.

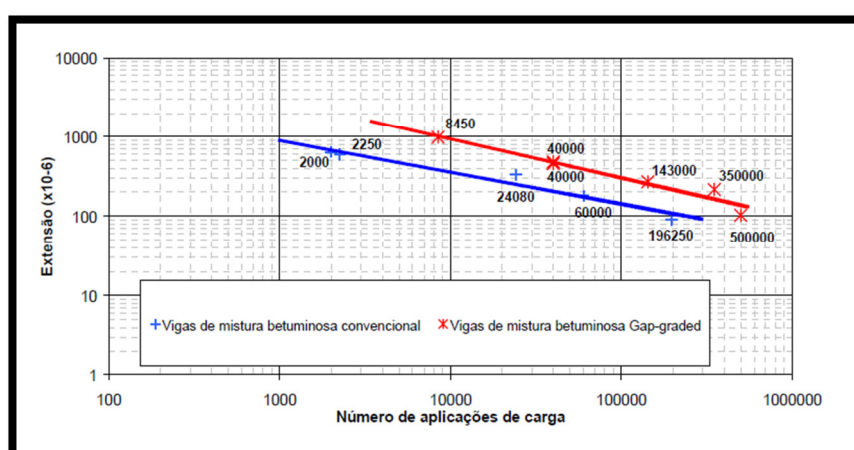


Figura 4. 15 - Resistência à fadiga (Sousa *et al.*, 2004)

Numa primeira análise comparou-se as misturas ensaiadas a 22°C cujos provetes tinham dimensões de 100x100x500 mm³, das misturas MBD-BMB e convencionais que sofreram envelhecimento.

Como mostra a Fig. 4.15 concluiu-se que para extensões entre 100 e 300×10^{-6} o número de aplicações de carga para a mistura betuminosa MBD-MBM é 3 a 5 vezes superior ao das misturas convencionais e para valores superiores a 300×10^{-6} esse valor aumenta para 5 a 10 vezes mais.

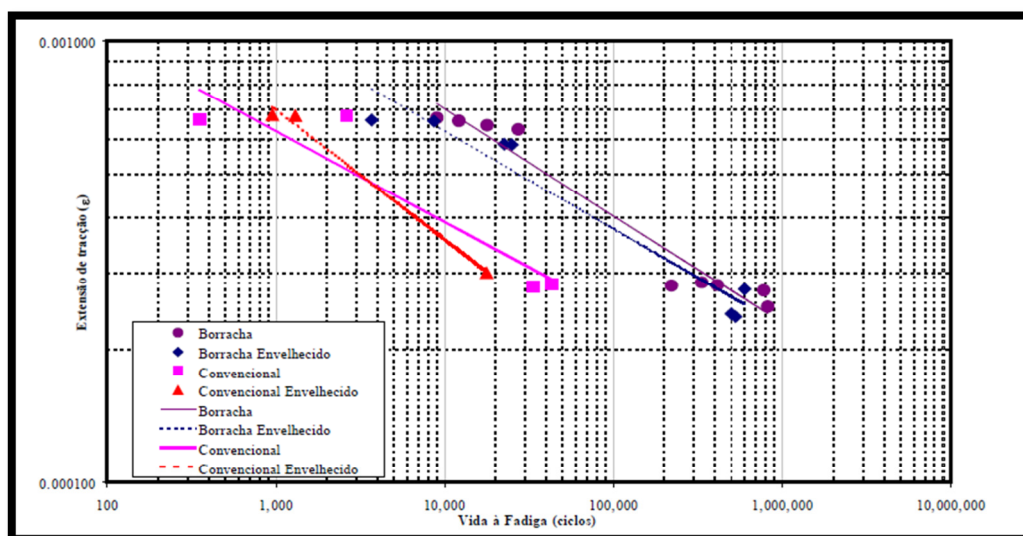


Figura 4. 16 - Comparação da vida à fadiga entre as misturas em estudo (Sousa *et al.*, 2004)

Numa segunda comparação, utilizou-se as misturas MBD-BMB e convencionais ensaiadas a 20°C, envelhecidas e não envelhecidas, com provetes de $6,3 \times 5,0 \times 380 \text{ mm}^3$.

Como mostra a Fig. 4.16 a resistência à fadiga para as misturas betuminosas modificadas com borracha atinge valores 10 vezes superiores às misturas convencionais. No gráfico da lei de fadiga foi possível verificar que o efeito de envelhecimento é maior nas misturas convencionais do que nas misturas modificadas com borracha.

Com base nestes ensaios foram ainda determinados os valores do módulo de rigidez onde, por um lado as misturas fabricadas com betume convencional apresentaram valores de módulo de rigidez mais constantes em função da extensão de tração do que as misturas produzidas com betume-borracha. Outra das características que se obteve foi o ângulo de fase, em que os valores diminuíram nas misturas sujeitas ao envelhecimento relativamente às não envelhecidas.

Estudo da Resistência à fadiga segundo a Norma EN 12697-24: 2004 (Miranda *et al.*, 2008)

Por iniciativa da RECIPAV, em 2008, foi elaborado um estudo no LNEC, para a avaliação da resistência à fadiga segundo a Norma Europeia EN 12697-24: 2004, de misturas betuminosas com betume modificado com altas percentagens de borracha.

Para a realização deste ensaio foram utilizadas duas misturas betuminosas rugosas, modificadas com borracha pelo processo de via húmida. A primeira foi uma mistura betuminosa com agregados de granito (MBR-granitos), da qual foi retirada uma laje da camada de desgaste de uma obra, sendo possível a obtenção de 12 provetes com dimensões médias de 40 cm de comprimento e secção transversal de $5,2 \text{ cm}^2$. A segunda foi produzida em laboratório e continha agregados de seixos (MBR-seixos). Os 19 provetes obtidos desta mistura ficaram com as dimensões de 40 cm de comprimento e $5,1 \text{ cm}^2$ de secção transversal.

Os betumes utilizados para estas misturas foram betumes com penetração nominal de 35/50, fornecidos pela CEPISA. A RECIPNEU foi o fornecedor do granulado de borracha, tendo sido aplicado 20% para modificação do betume, com granulometria de 0 a 0,6 mm.

Procederam-se aos cálculos baseados no ensaio de flexão em quatro pontos, a extensão controlada de acordo com a Norma Europeia EN 12697-24: 2004, a uma temperatura constante de 20 °C e frequência de aplicação de carga de 10 Hz. Os valores da extensão aplicada variaram entre 400×10^{-6} e 700×10^{-6} . Visto o ensaio ter sido de extensão controlada, os provetes foram ensaiados até ao ponto a partir do qual existe uma redução igual ou superior a 50% do módulo de deformabilidade inicial, tal como indicado na referida norma europeia.

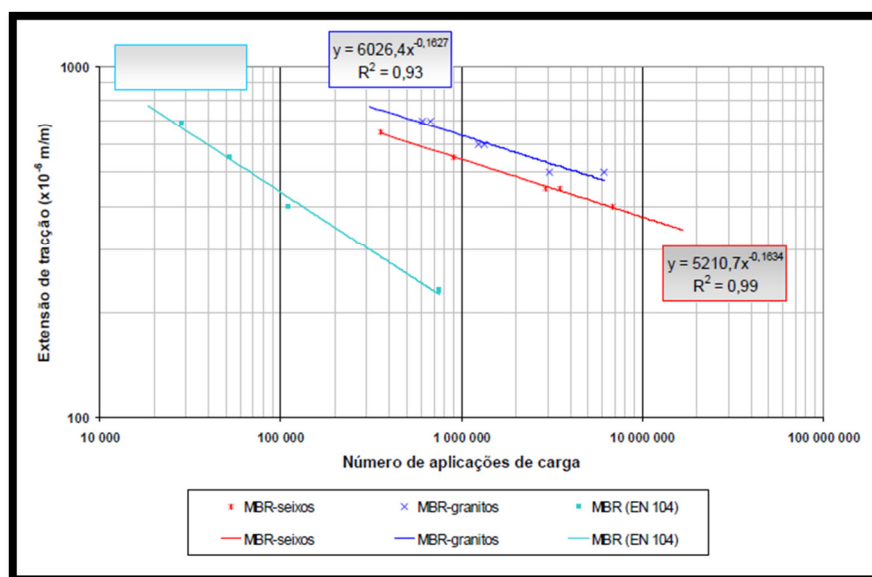


Figura 4. 17 - Valores da resistência à fadiga para os dois tipos de mistura (Miranda *et al.*, 2008)

Os resultados destes ensaios podem ser vistos na Fig. 4.17 com a representação das leis de fadiga. Concluiu-se que a resistência à fadiga de ambas as misturas é bastante elevada, apresentando valores de extensão superiores a 500×10^{-6} para mais de um milhão de solicitações de carga. Como se viu anteriormente a média de extensão das misturas convencionais é de 100×10^{-6} , sendo portanto muito menos resistentes à fadiga do que as misturas com BBA.

É ainda mostrado no gráfico uma comparação da resistência à fadiga entre as misturas referidas neste ensaio e as misturas do primeiro ensaio realizado em Portugal na estrada nacional 104. Foi possível observar que apesar de uma boa resistência à fadiga destas últimas, apresentam valores inferiores aos deste estudo. A principal razão para o aumento da resistência à fadiga foi a utilização de maiores percentagens de betume, neste caso de 8,5%.

Misturas Betuminosas Modificadas com Borracha incorporando a Via Seca – Trecho de Avis. (Dias, 2011)

A primeira e única experiência em Portugal com aplicação de misturas betuminosas com borracha utilizando a via seca para modificação das mesmas, foi realizada na Estrada Nacional 370 (Trecho de Avis). A obra consistiu em colocar uma camada de regularização em betão betuminoso com 0,04 cm de espessura e uma camada de desgaste com mistura betuminosa Rugosa modificada com borracha (Via Seca).

Após 48 horas do fim dos trabalhos de pavimentação foram extraídas lajes para a execução dos ensaios. Para tal, estudou-se três tipos de amostras, a mistura betuminosa rugosa com 20 a 23% de borracha (TA) e outras duas tendo sido, uma envelhecida a 5 dias (TAV) e outra a 9 dias (TAVV) em laboratório, de forma a simular o envelhecimento a curto e longo prazo, respectivamente. A mistura TA foi durante estes ensaios comparada com outra mistura semelhante (TB3), onde a grande diferença entre ambas foi a sua temperatura de aquecimento dos agregados, TA para 170 °C e TB3 para 210 °C. No quadro seguinte é apresentada a quantificação em termos de percentagem de ligante, borracha e betume.

Quadro 4. 8 – Percentagens de borracha, betume, ligante e de borracha relativamente à massa total de ligante para as duas misturas (Dias, 2011)

Tipo de Mistura	% borracha	% betume	% ligante	% de borracha em relação à massa total de ligante
TA	1,9	6,7	8,6	21,8
TB3	1,5	7,2	8,7	17,0

Estudou-se as misturas relativamente ao módulo de deformabilidade. Nas Figs. 4.18, 4.19 e 4.20, são apresentados os valores para as três amostras.

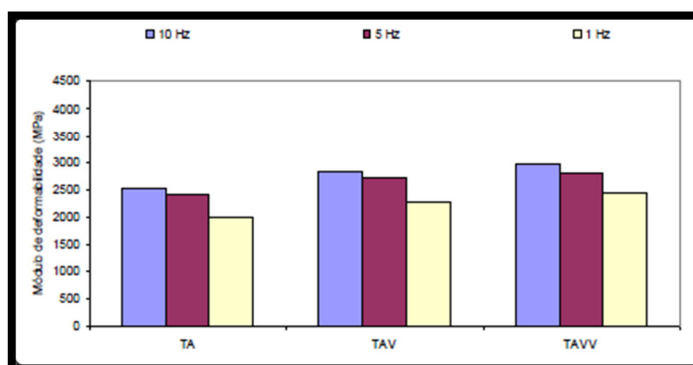


Figura 4. 18 – Módulo de deformabilidade à temperatura de 20 °C (Dias, 2011)

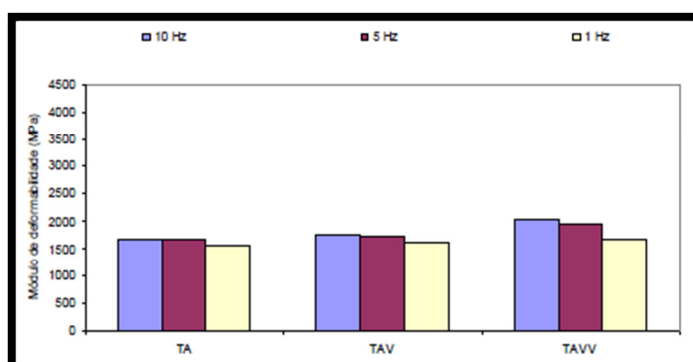


Figura 4. 19 - Módulo de deformabilidade à temperatura de 30 °C (Dias, 2011)

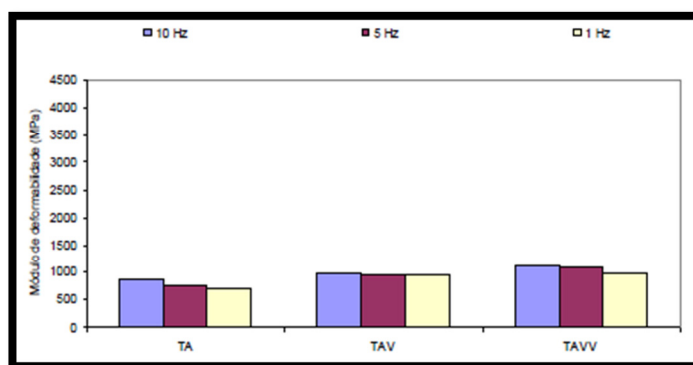


Figura 4. 20 - Módulo de deformabilidade à temperatura de 40 °C (Dias, 2011)

Dos resultados obtidos concluiu-se que a mistura TA obteve módulos de deformabilidade menores relativamente às misturas TAV e TAVV para todas as temperaturas de ensaio. Este facto deveu-se ao endurecimento do betume das misturas envelhecidas, o que provocou o aumento do módulo de deformabilidade. Concluiu-se ainda que a mistura TAVV apresentou um módulo superior à mistura TAV, pois devido ao maior tempo de envelhecimento, ganhou maior rigidez, logo um maior módulo de deformabilidade.

Quadro 4. 9 – Valores do módulo de deformabilidade para a mistura TB3 (Dias, 2011)

Temperaturas	Módulo de deformabilidade (Mpa)		
	Mistura TB3		
	10 Hz	5 Hz	1 Hz
20 °C	2290	2235	1975
30 °C	1584	1196	1313
40 °C	1223	1150	1078

Relativamente à mistura equivalente (TB3) concluiu-se que apresenta valores do módulo de deformabilidade (Quadro 4.9) semelhantes à mistura (TA) para a mesma temperatura de ensaio.

No que diz respeito à resistência à fadiga foram ensaiados nove provetes às temperaturas de 20 °C e 30 °C, com uma frequência 10 Hz e extensões de 300, 500 e 700 μm .

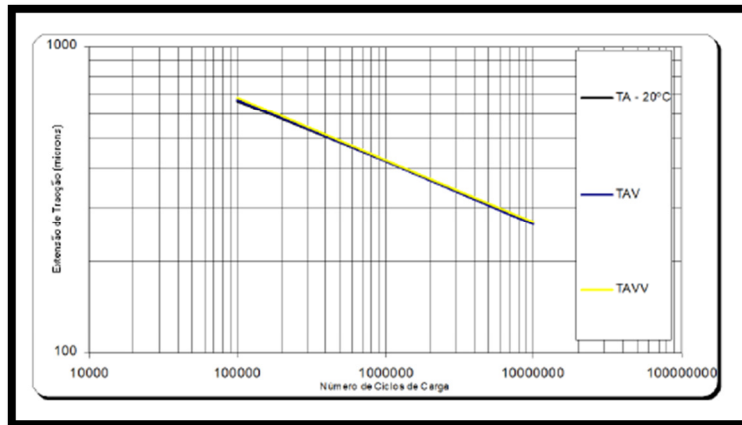


Figura 4. 21 - Representação das leis de fadiga à temperatura de 20 °C (Dias, 2011)

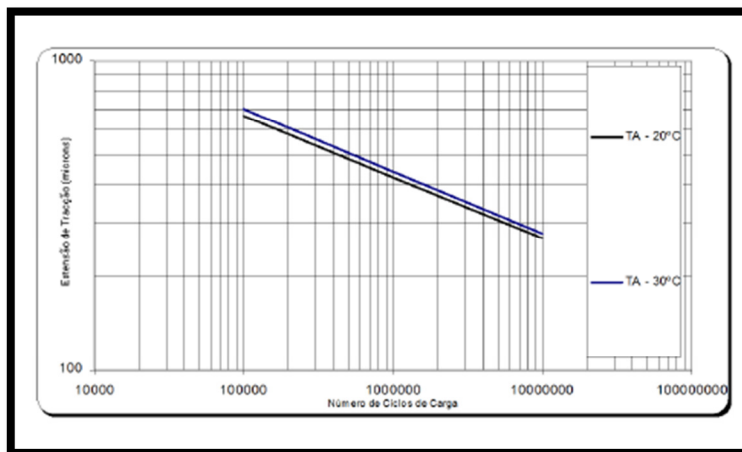


Figura 4. 22 – Representação das leis de fadiga da mistura TA para 20 °C e 30 °C. (Dias, 2011)

Dos ensaios à fadiga observou-se (Figs. 4.21 e 4.22) um aumento da resistência à fadiga com o aumento da temperatura, para a mistura TA. Conclui-se também que as misturas envelhecidas em laboratório apresentam valores semelhantes à mistura TA, logo o ensaio não parece simular o envelhecimento das misturas a longo prazo.

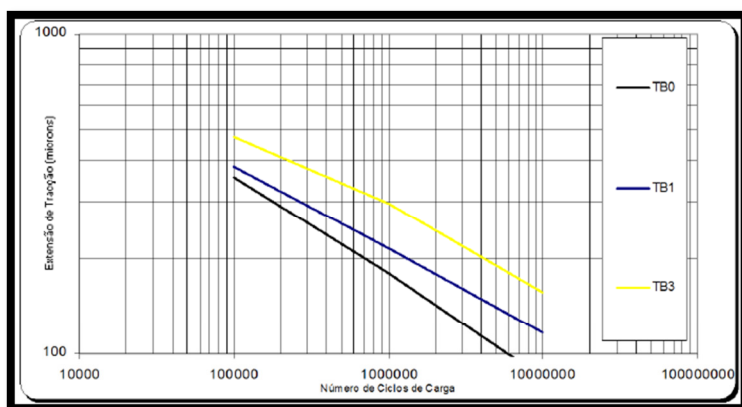


Figura 4. 23 – Representação gráfica das leis de fadiga para a mistura TB3 à temperatura de 20 °C (Dias, 2011)

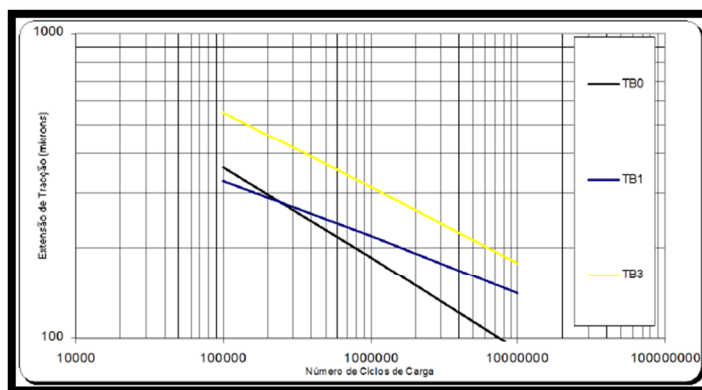


Figura 4. 24 - Representação gráfica das leis de fadiga para a mistura TB3 à temperatura de 30 °C (Dias, 2011)

A mistura TA apresenta resistência à fadiga para extensões inferiores a 300×10^{-6} e temperaturas de serviço de 20 °C e 30 °C, respectivamente superior cerca de 6 e 5 vezes quando comparada com a mistura TB3. A resistência à fadiga aumenta com a percentagem de ligante, neste caso e comparando as misturas TA e TB3 visto serem iguais, o factor importante foi a temperatura de fabrico, melhorando a resistência à fadiga para temperaturas de fabrico a 170 °C. Este facto foi justificado pela incineração da borracha para as temperaturas a 210 °C. Com esta diferença de fabrico a mistura TA apresentou valores 2 a 5 vezes superiores à mistura TB3.

4.3. Deformações Permanentes

Ensaio para caracterização de uma mistura betuminosa com BMB (Quaresma *et al.*, 1999)

Como foi referido anteriormente o primeiro ensaio em Portugal para caracterização de misturas betuminosas com betumes modificados com borracha foi realizado no laboratório do LNEC em 1999. O objectivo deste ensaio foi caracterizar este tipo de misturas para posterior aplicação nas Estradas Nacionais 104 e 105. Com base na descrição das características das misturas usadas, feita no capítulo da resistência à fadiga referente a este estudo, foi analisada a resistência às deformações permanentes para as mesmas.

Foi usado o procedimento de ensaio de acordo com a norma de ensaio espanhola NLT 173/84 – *Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio*. O provete com $300 \times 300 \times 50 \text{ mm}^3$ encontra-se dentro dum molde, que é compactado por vibro-compressão superficial, durante 4,75 segundos, e posteriormente inserido na máquina de ensaio que se encontra dentro de uma câmara de temperatura controlada. O ensaio teve início após o condicionamento da câmara e do provete durante 4 horas a 60 °C. Procedeu-se à aplicação do carregamento vertical constante e medição do valor do cavado de rodeira para vários minutos, sendo que os resultados corresponderam a velocidades de deformação entre os 105 e 120 minutos ($v_{105/120}$).

Através dos resultados para o ensaio de simulação de tráfego (Quadro 4.10) constatou-se que os valores da velocidade de deformação para a mistura betuminosa, com BMB têm uma variação menor em relação aos da mistura convencional. Conclui-se também que o valor médio dessa velocidade de deformação é superior para a mistura modificada com borracha, facto este leva a um comportamento inferior relativamente à mistura convencional.

Quadro 4. 10 - Resultados do ensaio de simulação de tráfego (Quaresma *et al.*, 1999)

Identificação das Amostras		Resultados	
Mistura Betuminosa Convencional	CLTP1	$V_{105/120}=4 \times 10^{-3}$ mm/min	Valor médio $5,3 \times 10^{-3}$ mm/min
	CLTP2	$V_{105/120}=4 \times 10^{-3}$ mm/min	
	CLTP3	$V_{105/120}=8 \times 10^{-3}$ mm/min	
Mistura Betuminosa com Betume-Borracha	RLTP1	$V_{105/120}=7 \times 10^{-3}$ mm/min	Valor médio $8,6 \times 10^{-3}$ mm/min
	RLTP2	$V_{105/120}=10 \times 10^{-3}$ mm/min	
	RLTP3	$V_{105/120}=9 \times 10^{-3}$ mm/min	

A norma de ensaio espanhola NLT 173/84 prevê um valor limite para $V_{105/120}$ de 15×10^{-3} mm/min, ou seja, apesar dos diferentes valores obtidos, ambas as misturas cumprem esse valor.

Estudo para a reabilitação dos troços das EENN 104 e 105 (Antunes *et al.*, 2000)

Os ensaios para estudar as deformações permanentes tiveram como base amostras de lajetas retiradas da obra e a realização de misturas em laboratório para criação de lajetas moldadas onde foram usados os mesmos betumes modificados com borracha para os ensaios de resistência à fadiga já referidos anteriormente.

Para avaliar as deformações permanentes recorreu-se ao ensaio de simulação de tráfego em pista de laboratório (*Wheel tracking*), realizado no LNEC e de acordo com a norma espanhola NLT 173/84. Foram serradas duas lajetas com localizações distintas. Da primeira retiraram-se dois provetes L1OI e L2OI e da segunda três provetes L3OII, L4OII e L5OII. Os resultados obtidos são apresentados na figura seguinte os quais incluem os valores das baridades e a velocidade de deformação dos provetes.

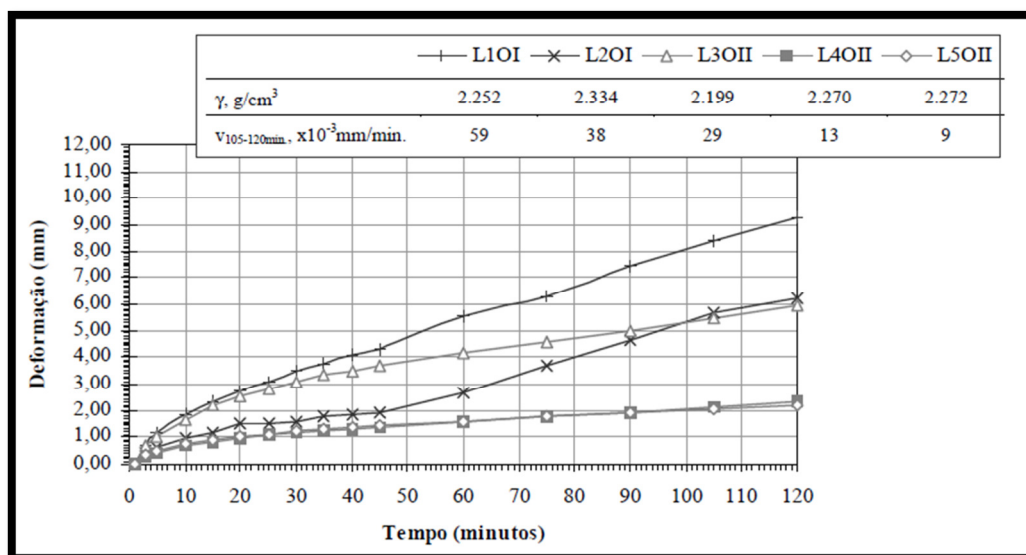


Figura 4. 25 - Resultados para provetes retirados de obra (Antunes *et al.*, 2000)

Com os resultados obtidos (Fig. 4.25) foi possível concluir que no primeiro grupo (L1OI, L2OI) as misturas apresentaram um desempenho fraco, facto este poderá ter a ver com as características do betume borracha, pois no que diz respeito à baridade não parece influenciar. Devido ao facto das características do betume-borracha poderem influenciar os resultados às deformações permanentes optou-se pelo fabrico de misturas em laboratório.

No segundo grupo de provetes (L3OII, L4OII, L5OII) a baridade foi claramente indicadora das diferenças obtidas. O provete L3OII apresentou os piores resultados, facto esse, devido ao mesmo

ter sido extraído da berma da estrada, enquanto os outros dois foram extraídos já em plena via o que difere nos valores da baridade.

Os ligantes das misturas fabricadas em laboratório compreendiam, betume-borracha produzido em laboratório com diferentes tempos de digestão; betumes-borracha que durante os primeiros 45 minutos de digestão sofreu “acidentalmente” um aumento de temperatura até 240 °C (BBL6); betumes-borracha armazenado durante um dado período de tempo, a 130°C, tendo sido posteriormente reaquecido e mexido a 180°C. Com a realização do ensaio de pista em laboratório obtiveram-se os resultados indicados na Fig. 4.26.

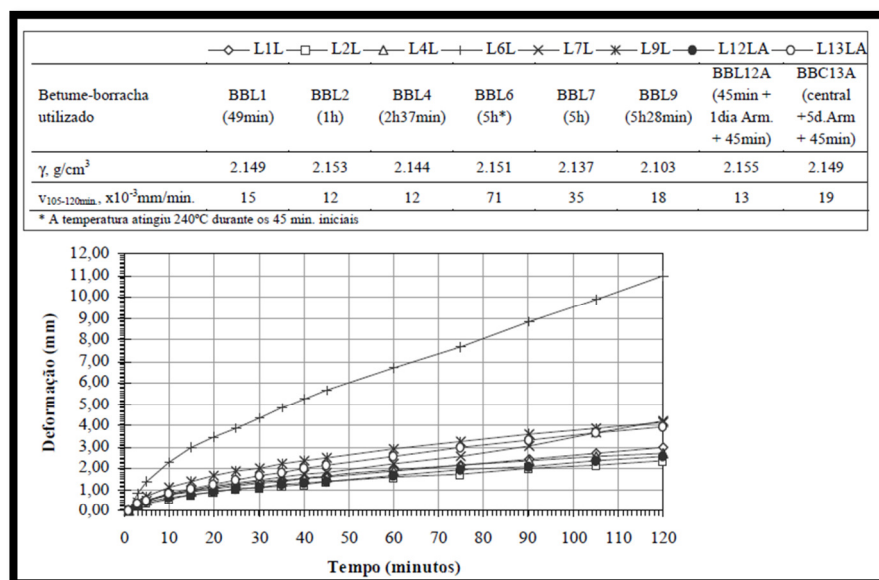


Figura 4. 26 - Resultados para provetes moldados em laboratório (Antunes *et al.*, 2000)

Como se pode observar os valores das baridades apresentados para as misturas de laboratório foram inferiores aos das misturas retiradas de obra. Pôde-se concluir que o método de compactação utilizado em laboratório é insuficiente em relação à compactação utilizada em obra, logo os resultados de ambos não são comparáveis.

No que diz respeito às misturas de laboratório conclui-se que a resistência às deformações permanentes diminui com o aumento do tempo de digestão dos betume-borracha.

Comparou-se ainda o comportamento das misturas, cujo betume-borracha produzido em laboratório foi armazenado um dia e o betume-borracha recolhido em central armazenado durante 5 dias. A primeira apresentou resultados razoáveis enquanto a segunda apresentou uma resistência inferior.

A mistura produzida com betume-borracha que sofreu um aumento de temperatura até 240 °C durante o tempo de digestão apresentou uma resistência às deformações permanentes muito inferior às restantes.

Estudo do troço da EN 104 após 6 anos de serviço (Baptista *et al.*, 2006)

O estudo do troço da EN 104 após 6 anos de serviço passou também pela avaliação do comportamento à deformação permanente. Para tal foram realizados ensaios de simulação de tráfego em pista de laboratório, no equipamento do LNEC, de acordo com a norma espanhola NLT-173/84. A temperatura de ensaio foi de 60°C e a dimensão dos provetes de 30x30x5 cm3.

Quadro 4. 11 – Resultados da velocidade de deformação para os diferentes anos de ensaio (Baptista et al., 2006)

Identificação		Local e data de recolha / preparação das vigas	Ligante utilizado no fabrico das misturas	Baridade (g/cm ³)		Velocidade de deformação entre os 105 e 120 minutos (x10 ⁻³ mm/min.)	
				Valores Individuais	Valores Médios	Valores Individuais	Valores Médios
Lab. B35/50	LL1	Laboratório; 1999	B 35/50	2,292	2,29	4	5
	LL2			2,289		4	
	LL3			2,290		8	
EN 104 (2000) BMB	LI-1	EN 104 (2000) BMB	BMB	2,270	2,27	13	11
	LI-2			2,272		9	
EN 104 (2005) BMB	LII-1	EN 104 (2005) BMB	BMB	2,256	2,26	1	2
	LII-2			2,258		2	

Através do quadro 4.11 é possível comparar os resultados obtidos nos diferentes anos de ensaio. Assim, concluiu-se que todas as misturas apresentam um comportamento satisfatório à deformação permanente, uma vez que o valor médio da $V_{105-120min}$ é inferior a 15 mm/min, conforme estipulado na norma espanhola NLT 173/84. O comportamento às deformações permanentes das MBR-BMB aplicadas em obra melhorou ao longo da sua vida em serviço, apresentando após cerca de 5 anos em serviço, valores de $V_{105-120min}$ relativamente reduzidos.

Estudo da reabilitação do pavimento do lanço CRIL-Loures da A8 (Pestana *et al.*, 2006)

Na sequência do estudo referente à reabilitação do pavimento do lanço CRIL-Loures da A8, já referido anteriormente realizou-se mais um ensaio importante, para determinar a resistência às deformações permanentes. Para tal recorreu-se ao ensaio de corte a altura constante sobre provetes cilíndricos (retirados de lajes de trechos da faixa de rodagem e a berma) com 15 cm de diâmetro e 5 cm de espessura, segundo a norma AASTHO TP7-94, ensaiados a 54 °C.

O objectivo foi obter resultados em termos de número de eixos-padrão de 80 kN necessários para produzir uma rodeira com 10 mm de profundidade.

A partir dos resultados da Fig. 4.27 conclui-se que para a mistura SBS a resistência às deformações permanentes é maior na faixa de rodagem, podendo esse facto ser derivado da pouca porosidade da mistura na faixa de rodagem.

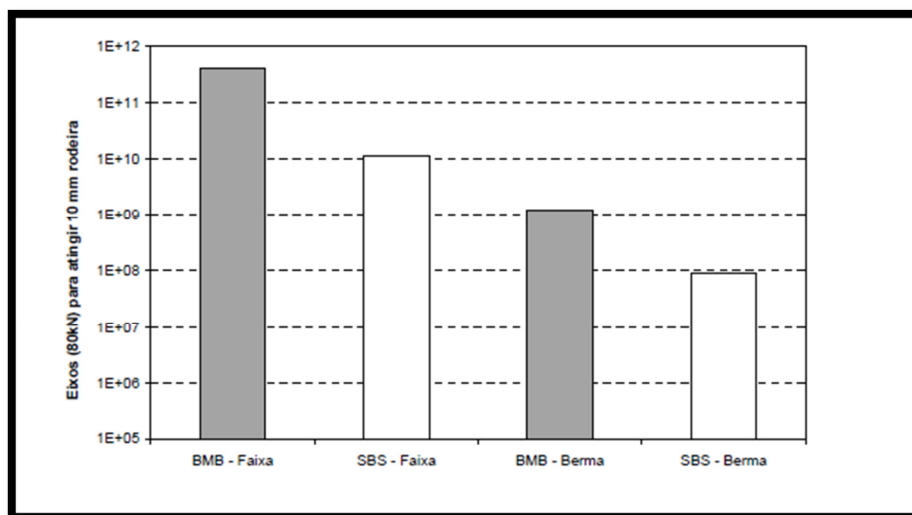


Figura 4. 27 - Deformações permanentes para as misturas em estudo (Pestana *et al.*, 2006)

Quanto à mistura BMB, resultou também uma maior resistência às deformações permanentes na faixa de rodagem comparativamente à berma. Esses resultados deveram-se principalmente à menor percentagem de betume na faixa de rodagem e à reduzida espessura (2 cm) que provoca um grande imbricamento entre os agregados aumentando assim a sua resistência ao corte.

Na comparação entre as duas misturas, a mistura BMB apresentou uma melhor resistência às deformações permanentes relativamente à mistura SBS. A principal razão para este facto foi que a mistura BMB apresentou percentagens de betume equivalentes ao estudo de formulação, enquanto a mistura SBS tinha uma percentagem de betume superior ao seu estudo de formulação.

Comparação da resistência às deformações permanentes entre misturas com betume modificado com borracha reciclada de pneus e convencionais, fabricadas em laboratório (Sousa *et al.*, 2004)

Com o ensaio de resistência à fadiga realizado, procedeu-se também à caracterização da resistência às deformações permanentes para as mesmas misturas, MBD-BMB e macadame betuminoso, já caracterizadas anteriormente.

Para a comparação destas duas misturas betuminosas realizou-se o ensaio de corte a altura constante. Utilizaram-se 8 provetes cilíndricos, 4 para cada mistura, de 15 cm de diâmetro e 5 cm de altura, ensaiados a 53°C. Os provetes foram sujeitos a um esforço de corte de 70 KPa durante 0,6 s e seguidos de um período de repouso de 0,1 s. Este ensaio permite obter a lei constitutiva do material em termos de resistência ao corte.

O valor da resistência das misturas betuminosas às deformações permanentes foi obtido pela média dos valores dos ensaios realizados e concluiu-se que num betume convencional a deformação permanente é de 12,5 mm para $1,1 \times 10^6$ eixos padrão de 80 kN, enquanto, que na mistura com betume-borracha é apresentada uma deformação permanente de 12,5 mm para $2,4 \times 10^6$ eixos-padrão de 80 kN, o que permite dizer que a mistura com BMB apresenta melhores resultados (Fig. 4.28).

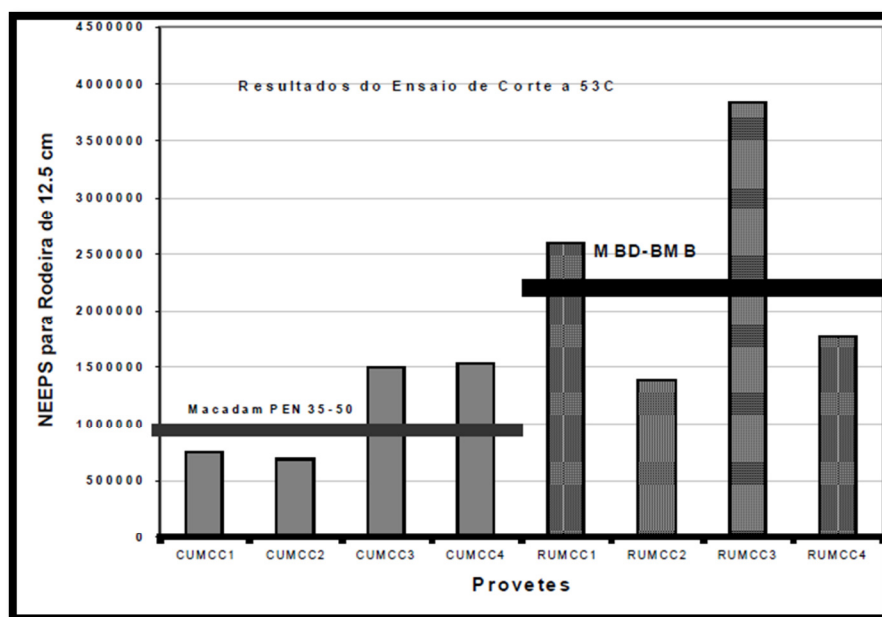


Figura 4. 28 - Comparação da resistência ao corte entre as duas misturas (Sousa *et al.*, 2004)

Misturas Betuminosas Modificadas com Borracha incorporando a Via Seca – Trecho de Avis. (Dias, 2011)

No seguimento do cálculo das características mecânicas para esta experiência por via seca foi feito o ensaio para as deformações permanentes sendo utilizada a metodologia da norma espanhola NLT 173/84. Foram calculados os valores médios de velocidade de deformação e deformação vertical máxima em termos de deformação total no final do ensaio e de velocidade de deformação entre os 105 e 120 minutos. Foram usadas duas temperaturas de ensaio, 50 °C e 60 °C. O quadro seguinte mostra os resultados.

Quadro 4. 12 – Resultados da resistência às deformações permanentes (Dias, 2011)

Provete	$V_{def(105-120)} (10^{-3} \text{ mm/min})$	Deformação Vertical (mm)
TA (50 °C)	4,9	1,64
TA (60 °C)	11,7	5,64
TB3 (50 °C)	1,8	0,87
TB3 (60 °C)	8,7	3,68

Para ambas as temperaturas as misturas TA e TB3 cumprem o limite de velocidade de deformação de $15 \times 10^{-3} \text{ mm/min}$.

No que diz respeito à comparação das duas misturas, houve uma aparente melhoria da resistência às deformações permanentes para as misturas fabricadas a 210 °C. Facto este deve-se ao envelhecimento do ligante com perda de propriedades reológicas que vai conduzir a um pavimento em serviço com a durabilidade prejudicada a curto e médio prazo.

4.4. Ruído

Avaliação do efeito do pavimento no ruído de tráfego rodoviário. BMB vs BAC (Ruivo, 2004)

Nos finais de 2003 a entidade CertiProjecto realizou ensaios para fazer uma avaliação quantificada e objectiva dos benefícios no que diz respeito à poluição sonora resultante da interacção pneu/pavimento. Para tal os ensaios foram realizados na Auto-Estrada A8 nos sentidos Lisboa-Leiria e vice-versa, onde existem vários troços dos pavimentos a avaliar, no caso, pavimento betuminoso com borracha (BMB) e pavimento de betão armado contínuo (BAC).

De forma a obter resultados conclusivos e objectivos foram assim seleccionados troços onde fosse possível medir simultaneamente os níveis sonoros dos dois tipos de pavimentos e que cumprissem os seguintes requisitos: Mesmas características de tráfego, ou seja, os mesmos veículos à mesma velocidade; velocidades superiores a 100 km/h e constantes; tráfego contínuo e regular; locais abertos para evitar o efeito de reflexão sonora; ausência de outras fontes sonoras.

Para estes ensaios foram utilizados, um calibrador de sonómetros e sonómetros integrados que foram colocados à mesma distância da berma e em posições próximas desta para não sofrerem alterações de factores como a acção do vento, da humidade ou da temperatura do ar.

Relativamente às características dos troços em estudo, o pavimento com BMB é constituído por uma mistura betuminosa aberta (Quadro 4.13) com betume convencional 35/50 modificado com granulado de borracha. A percentagem de betume modificado variou entre 9,0 a 9,5 % e com teor de borracha incorporada na ordem dos 20%. O pavimento BAC é um pavimento de betão armado contínuo com betão armado corrente, rígido e estriado no sentido transversal da via.

Quadro 4. 13 - Dados da curva granulométrica (Ruivo, 2004)

Agregados	(%)	Granulometria
Brita 1	43	7/12 mm
Brita 0,5	50	4/7 mm
Pó	5	0/4 mm
Cal	2	-
Total	100	-

A formulação das misturas betuminosas foi estabelecida segundo a metodologia de Marshall de acordo com os valores do quadro 4.14.

Quadro 4. 14 - Resultados dos Ensaio Marshall (Ruivo, 2004)

	Baridade (g/cm ³)	Porosidade (%)	VMA (%)	Resistência Conservada (%)
Varição de valores para os diferentes troços	2,0 a 2,14	14,5 a 18,0	24,2 a 33,2	83,6 a 91,8



Figura 4. 29 - Fronteira dos pavimentos em estudo (Ruivo, 2004)

Realizaram-se cinco ensaios em diferentes troços dos pavimentos em estudo e foram seguidos os procedimentos da normalização portuguesa aplicável em vigor, NP 1730-3: 1996 – Acústica – Descrição e medição do ruído ambiente.

Quadro 4. 15 - Resultados das medições na Auto-Estrada A8 (Ruivo, 2004)

	Distância ao eixo da faixa (m)	LAeq, em dB(A)		
		BMB	BAC	Δ
1º Ensaio	20,0	63,3	74,3	11,0
2º Ensaio	8,5	70,9	80,2	9,3
3º Ensaio	8,5	70,4	80,1	9,7
4º Ensaio	6,5	72,6	80,6	8,0
5º Ensaio	6,5	73,5	82,3	8,8

No quadro acima podem observar-se os valores dos resultados em decibéis para os cinco ensaios realizados. Foi possível verificar que para o pavimento com mistura BMB os valores obtidos foram mais baixos do que para o pavimento de BAC existindo diferenças médias na ordem dos 8 a 10 dB(A). Conclui-se que é uma vantagem a utilização em camadas de desgaste de pavimentos modificados com pó de borracha.

De acordo com a normalização adequada (ISO 11819-1, 1997) – “*Acoustics - Measurement of influence of road surfaces on traffic noise*” as medições deste tipo devem ser realizadas a uma distância de 7,5 m do eixo da via mas, visto o objectivo deste ensaio ter sido a comparação entre dois pavimentos, as distâncias utilizadas não tiveram influência nos resultados obtidos.

Avaliação do efeito do pavimento no ruído de tráfego rodoviário. BMB vs BBR (Ruivo_A, 2004)

Em Março de 2004, de novo a entidade CertiProjecto, realizou ensaios para fazer uma avaliação quantificada e objectiva dos benefícios no que diz respeito à poluição sonora resultante da interacção pneu/pavimento, em tudo semelhante à referida anteriormente. A única diferença para o ensaio realizado em 2003 (referido acima) foi o tipo de pavimento com o qual se comparou o pavimento com BMB. Desta vez a comparação foi feita com um pavimento de betão betuminoso rugoso convencional (BBR), com granulometria 0/14 mm, bastante usual em camadas de desgaste.

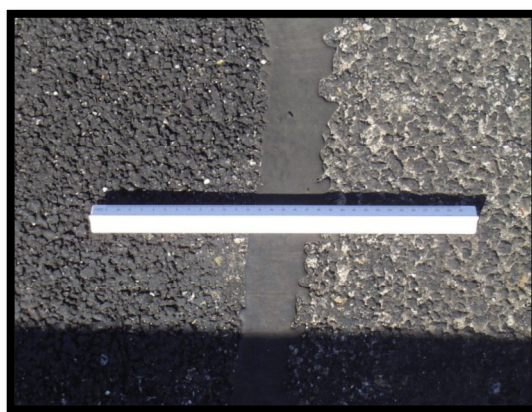


Figura 4. 30 - Diferença dos pavimentos a estudar, mistura com BMB (esq.) e BBR (dir.)
(Ruivo_A, 2004)

Para esta comparação, neste caso foram realizados dois ensaios cujos resultados se encontram no quadro 4.16.

Quadro 4. 16 - Resultados finais (Ruivo_A, 2004)

	Distância ao eixo da faixa (m)	LAeq, em dB(A)		
		BB	BMB	Δ
1º Ensaio	6,5	79,1	73,5	5,6
2º Ensaio	8,5	78,6	73,5	5,1

Concluiu-se com estes ensaios que o impacte acústico provocado pelo tráfego é menor nos pavimentos com misturas modificadas com BMB, existindo diferenças médias na ordem dos 5 a 6 dB(A) entre os níveis registados nos pisos ensaiados.

Estudo Acústico: Medidas de minimização de ruído na Auto-Estrada A21 (Abreu & Coelho, 2007)

No ano de 2004 a Auto-Estrada A21 Ericeira/Mafra/Malveira foi alvo de um estudo, por parte da empresa *Acustic Control*, com o objectivo de minimizar o ruído provocado pelo tráfego, principalmente junto aos locais onde os níveis sonoros excediam os limites legais. Para tal fez-se o dimensionamento de seis barreiras acústicas tendo em conta o tipo de pavimento que se encontrava na Auto-Estrada, no caso, uma camada de desgaste em piso betuminoso clássico.

Mais tarde, em Julho de 2007 a *Acustic Control* procedeu a uma reavaliação e redimensionamento da mesma Auto-Estrada, com o mesmo objectivo de criar medidas de minimização de ruído. Neste caso o dimensionamento das barreiras acústicas foi feito assumindo a aplicação de uma camada de desgaste com uma mistura betuminosa modificada com borracha. Com isso procedeu-se ao dimensionamento de cinco barreiras acústicas de forma a proteger áreas de ocupação habitacional.

A adopção de piso com BMB face ao piso betuminosos clássico, permite uma redução nos níveis de ruído de 5 a 7 decibéis. Como tal no estudo de 2007 considerou-se uma perda de 5 dB (A). No quadro 4.15 pode ver-se as dimensões das barreiras acústicas para o dimensionamento de 2004 para pisos sem BMB e para o dimensionamento de 2007 para pisos com BMB.

Com a diminuição em 5 dB (A) do ruído provocado pelo tráfego rodoviário no piso com BMB, as barreiras acústicas foram dimensionadas com áreas (alturas e comprimentos) consideravelmente

menores, como se pode observar no quadro 4.17. A redução das áreas com a adopção do pavimento com BMB foi na ordem dos 65%.

Quadro 4. 17 - Análise comparativa de resultados das duas misturas (Abreu & Coelho, 2007)

Barreira nº. (*)/Zona, lado	Sem piso BMB			Com piso BMB		
	Área (m ²)	Altura (m)	Extensão (m)	Área (m ²)	Altura (m)	Extensão (m)
1(1)/Km 1+300, Norte	1512	4,5	336	425	2,5	170
2(2)/Km 4+450, Sul	531	3,0	177	350	2,0	175
3(-)/Km 6+200 – Km 6+400, Oeste	1911	4,0 - 6,0	340	-	-	-
4(3)/Km 6+200 – Km 6+400, Este	1445	3,0 – 5,0	331	750	5,0	150
5(4)/Km 7+300 – Km 7+900, Oeste	1427	3,5 – 5,5	310	645	3,0	215
6(5)/Km 7+300 – Km 7+900, Este	840	4,0	210	300	2,0	150

(*) A numeração entre parêntesis reporta-se às barreiras acústicas do presente projecto

Foi possível observar também que a barreira acústica número três foi retirada, visto que a aplicação do pavimento com BMB reduziu de tal forma o ruído que os níveis apresentados não excediam os limites dos critérios do projecto.

Conclui-se também que o impacte sonoro em toda a extensão do traçado foi menor. As menores dimensões dos painéis resultaram numa redução do impacte paisagístico na proximidade das zonas de habitação.

Estudo da Universidade do Minho – Contribuição da superfície dos pavimentos para a produção de ruído (Freitas, 2008)

O departamento de engenharia civil da Universidade do Minho realizou um estudo para avaliar a contribuição dos pavimentos para a produção de ruído. Para tal foram seleccionados sete locais com cinco tipos diferentes de pavimentos betuminosos. A metodologia de ensaio baseou-se no Método Estatístico de Passagem (ISO 11819-1: 1997) que avalia as propriedades acústicas das misturas betuminosas através das características da textura superficial e da porosidade da camada. Essa avaliação divulga a medição do nível sonoro máximo de um número de passagens individuais de três categorias de veículos significativos, a determinadas velocidades, em dois tipos de superfícies e que não tenham patologias. Com base neste método é possível concluir que uma determinada camada pode ser ou não silenciosa. Considera-se uma camada silenciosa quando o nível de ruído devido à interacção pneu-pavimento reduz no mínimo 3 dB (A) comparativamente a uma camada que seja considerada de referência e de uso corrente (Sandberg et al., (2002), citado em Freitas, (2008)).

Assim para proceder ao ensaio foram seleccionados dois veículos ligeiros e um pesado de dois eixos, os quais fizeram um total de 188 passagens, a 3 níveis de velocidade, com o motor ligado, no conjunto dos sete pavimentos. Registou-se o nível e o espectro de ruído, a velocidade dos veículos, a velocidade do vento e a temperatura do ar e do pavimento. Para que o registo destas propriedades não sofresse alterações, o ensaio decorreu durante a noite e com o corte do tráfego normal, garantindo-se assim as condições relativas ao tráfego como, o tipo de veículo, tipo de pneu e as velocidades constantes e, o nível de ruído não fosse influenciado por outros veículos.

Nos sete locais escolhidos consideraram-se os seguintes tipos de misturas betuminosas, com a seguinte caracterização: dimensão máxima do inerte D (máx), a porosidade (n), a percentagem de betume (b), a percentagem de borracha por peso de betume (bb) e a idade da camada de desgaste.

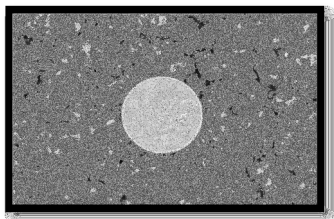


Figura 4. 31 - Superfície S1 (BBR12) – Camada de desgaste de betão betuminoso rugoso com 1 ano. (Freitas, 2008)

D(máx): 12 mm
n: 3,6%
b: 5,1%



Figura 4. 32 - Superfície S2 (BBR6) – Camada de desgaste de microbetão betuminoso rugoso com 2 anos. (Freitas, 2008)

D(máx): 6 mm
n: 6,6%
b: 6,2%

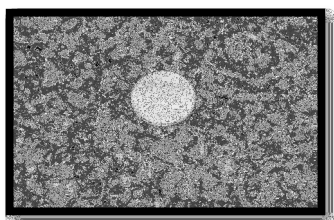


Figura 4. 33 - Superfície S3 (MBR – BMB15) – Camada de desgaste de mistura betuminosa rugosa com betume modificado com borracha com 7 anos. (Freitas, 2008)

D(máx): 15 mm
n: 4,5%
b: 7,5%
bb: 18%

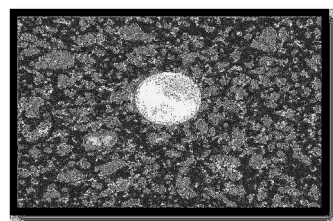


Figura 4. 34 - Superfície S4 (BBD16) – Camada de desgaste de betão betuminoso denso com 10 anos. (Freitas, 2008)

D(máx): 16 mm
n: 5,0%
b: 4,9%

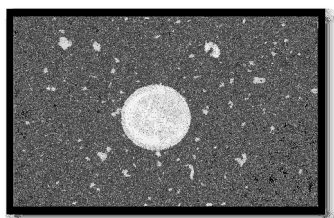


Figura 4. 35 - Superfície S5 (MBR7) – Camada de desgaste de microbetão betuminoso rugoso com 4 anos. (Freitas, 2008)

D(máx): 7 mm
n: 6,1%
b: 6,1%

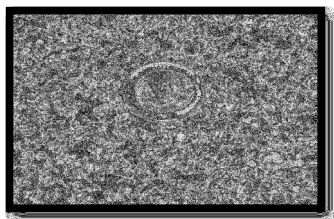


Figura 4. 37 - Superfície S7 (MBA – BMB10) – Camada de desgaste de mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha com idade inferior a 1 ano. (Freitas, 2008)

D(máx): 10 mm
n: 13,6%
b: 9%
bb: 18%



Figura 4. 36 - Superfície S6 (MBA – BMB12) – Camada de desgaste de mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha com idade inferior a 1 ano. (Freitas, 2008)

D(máx): 12 mm
n: 13%
b: 9%
bb: 18%

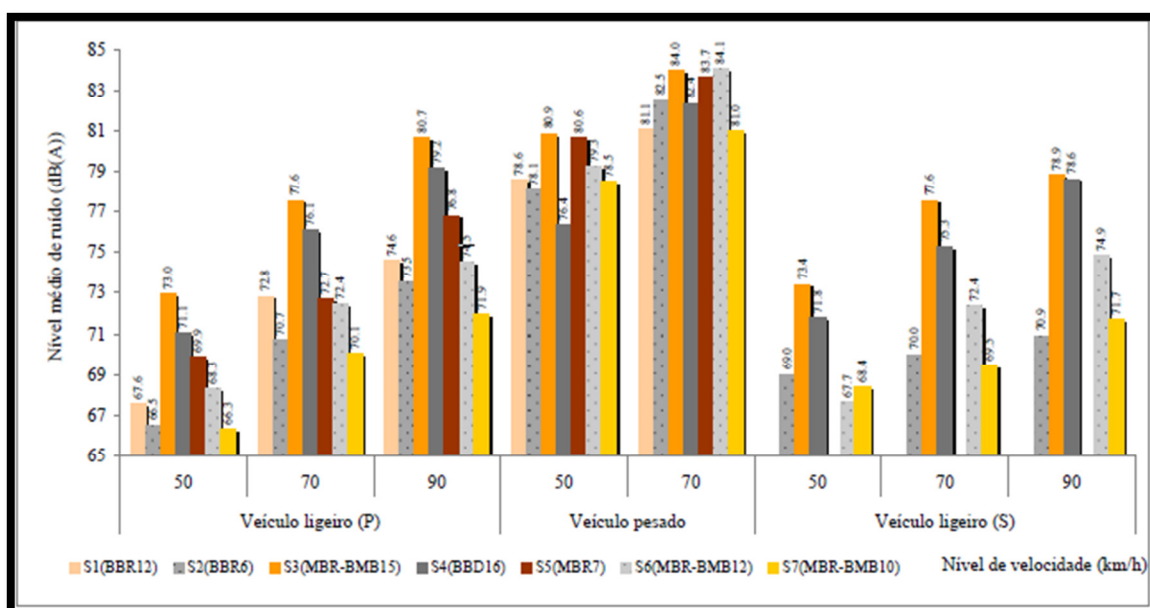


Figura 4. 38 - Nível de ruído médio (Freitas, 2008)

Realizados os ensaios chegaram-se aos resultados apresentados no gráfico acima do qual se puderam obter as seguintes conclusões:

- O nível de ruído aumentou com o aumento de velocidade para qualquer das superfícies e para todos os veículos. A superfície S7 (MBA – BMB10) foi a que registou o aumento do nível de ruído mais reduzido com o aumento da velocidade.

- Para veículos ligeiros a superfície S7 (MBA – BMB10) apresentou reduções muito próximas, cerca de 5 db(A) para velocidades de 50 Km/h, de 6 db(A) para velocidades de 70 Km/h e superior a 7 db(A) para velocidades de 90 Km/h, quando comparada com a superfície S2 (BBR6).

- Na generalidade as misturas com BMB apresentaram níveis de ruído inferiores às misturas convencionais. Excepção feita à mistura S3 (MBR-BMB15) que apresentou em média os valores mais elevados de todas as misturas. Este facto pode dever-se ao pavimento em estudo já estar em serviço à 7 anos quando comparado com os outros em média com 1 ou 2 anos.

4.5. Sensibilidade à Água

Avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas com betume modificado com alta percentagem de borracha (Baptista *et al.*, 2008)

Um dos objectivos para a optimização do comportamento das misturas betuminosas modificadas com borracha passa pela avaliação da sensibilidade à água das mesmas.

Em 2008 foi realizado um estudo que avaliou a sensibilidade à água de misturas com betume modificado (por via húmida) com alta percentagem de borracha. Este estudo foi feito com base na norma militar americana MIL – STD – 620A e na norma europeia EN 12697-12: (2003). Com a utilização das duas normas foi possível fazer uma análise comparativa.

O método baseado na norma americana assenta na comparação entre forças de rotura Marshall de dois grupos de provetes acondicionados de forma distinta. Para tal, foi fabricada uma mistura betuminosa dividida em 8 provetes cilíndricos, sensivelmente com a mesma baridade média e, posteriormente subdivididos em dois grupos. O primeiro grupo de provetes foi imerso em água a 60°C durante 30 minutos, sendo de seguida determinada a força de rotura de cada provete através do ensaio Marshall e calculado o respectivo valor médio (F1).

O segundo grupo foi acondicionado durante 24 horas num banho de água a 60°C, após o que é determinado o valor médio das respectivas forças de rotura Marshall (F2).

Com base nos resultados obtidos para as forças de rotura médias, calculou-se o Índice de Resistência Conservada (IRC), através da expressão 2.4.

A avaliação da sensibilidade à água através do método da norma europeia consiste na comparação entre os valores médios das resistências à tracção em compressão diametral, determinadas de acordo com a norma EN 12697-23, de dois grupos de provetes cilíndricos previamente acondicionados em condições distintas.

Para este ensaio foram preparados 3 provetes cilíndricos para cada grupo, sendo as dimensões dos provetes condicionadas pela dimensão máxima do agregado. Como aconteceu no caso baseado no método americano a baridade média de cada grupo de provetes era semelhante.

O primeiro grupo de provetes foi acondicionado ao ar a (20 ± 5) °C. O segundo grupo foi acondicionado em banho de água a (40 ± 1) °C, por um período de 68 h a 72 h.

Uma vez concluído o período de condicionamento, os provetes foram sujeitos a ensaios para determinar a resistência à tracção indirecta, optando-se por uma temperatura de ensaio de 25°C, tendo em atenção as vantagens apontadas na própria EN 12697-12 para a selecção desta temperatura.

A partir dos valores médios das resistências à tracção indirecta dos provetes imersos (ITS_w) e “a seco” (ITS_d), é calculada a resistência conservada em tracção indirecta (ITSR) através da fórmula:

$$ITSR = 100 \times \frac{ITSw}{ITSd} \quad (4.2)$$

A aplicação desta norma reveste-se de algumas dificuldades, relacionados com o condicionamento dos provetes imersos, particularmente com a aplicação do vácuo. Com efeito, a norma recomenda que seja efectuada uma verificação do volume dos provetes após a aplicação do vácuo, não devendo haver um aumento de volume dos provetes superior a 2%.

As propriedades da mistura utilizada, no caso, mistura betuminosa com alta percentagem de borracha e as fracções granulométricas dos agregados são apresentados nos quadros 4.18 e 4.19, respectivamente. Nas misturas fabricadas, ambas de granulometria descontínua, foram usados dois tipos de agregados diferentes, granitos e seixos, com dimensão nominal 0/12,5mm. A percentagem de ligante BMB utilizado foi de 8,5%.

Quadro 4. 18 - Propriedades do BMB com alta percentagem de borracha (Baptista *et al.*, 2008)

Propriedade	Norma de Ensaio	Uni - dade	Betume 35/50 modificado com 18 a 22% de borracha
Viscosidade a 175°C (Viscosímetro Brookfield, haste SC4-27, 20 rpm)	EN13302: 2003	mPa.s	2500 – 4500
Penetração a 25°C (100g, 5s)	EN1426: 1999	0,1 mm	15 – 30
Temperatura de amolecimento (método de anel e bola)	EN1427: 1999	°C	≥ 68

Quadro 4. 19 - Granulometria das misturas (Baptista *et al.*, 2008)

Misturas Betuminosas	Misturas Agregados	
	Fracção granulométrica	Percentagem de material
MBR - Granitos	Fracção 10/15	23%
	Fracção 6/10	58%
	Fracção 0/5	17%
	Filer comercial	2%
MBR - Seixos	Fracção 10/16	15%
	Fracção 4/10	53%
	Fracção 0/6	30%
	Filer comercial	2%

Os resultados apresentados nos Quadros 4.20 e 4.21 permitiram chegar a algumas conclusões como:

A aplicação da norma militar americana MIL-STD-620A conduziu a resultados muito elevados para ambas as misturas, correspondentes a valores muito elevados da resistência conservada. Constatou-se também que a diferença dos valores para as duas misturas são muito próximos o que dificulta uma possível comparação entre as mesmas.

Os valores obtidos pela norma europeia EN 12697-12 são mais reduzidos e diferentes para as duas misturas, quando comparados com o método da norma americana. Com estes valores foram notórias as diferenças nos comportamentos dos dois tipos de misturas em presença da água. A mistura com seixo obteve uma menor resistência à acção da água, como seria de esperar.

Com a experiência adquirida pelo LNEC neste tipo de ensaios, através da aplicação do método baseado na norma europeia, têm vindo a sentir dificuldades, em particular na aplicação do vácuo

nos provetes, como foi referido, chegando a resultados muito variáveis de resistência conservada, em regra inferiores aos esperados. Torna-se necessário aquando da realização dos mesmos seguir alguns passos importantes preconizados pelo LNEC para a aplicação do vácuo de forma a conseguir os resultados desejados, como por exemplo:

- Colocar os provetes no recipiente de vácuo, com água destilada a 20 °C até pelo menos 20 mm acima do topo dos provetes.
- Aplicar o vácuo para obtenção de uma pressão absoluta de $(6,7 \pm 0,3)$ kPa em (10 ± 1) min.
- Manter o vácuo durante (30 ± 5) min.
- Deixar entrar lentamente a pressão até a pressão atmosférica.
- Deixar os provetes imersos durante um período adicional de (30 ± 5) min.

Quadro 4. 20 - Resultados segundo a norma americana (Baptista *et al.*, 2008)

Mistura Betuminosa	Porosidade média dos provetes (%)	Ensaios		
		Grandeza	Provetes imersos 30 min. 60 °C	Provetes imersos 24h 60 °C
MBR – Granitos	4,6	Baridade média (kg/m ³)	2202	2199
		Força de rotura Marshall média (kN)	11,8	11,3
		Resistência conservada Marshall (%)	96	
MBR - Seixos	2,8	Baridade média (kg/m ³)	2278	2283
		Força de rotura Marshall média (kN)	13,3	13,2
		Resistência conservada Marshall (%)	99	

Quadro 4. 21 - Resultados segundo a norma europeia (Baptista *et al.*, 2008)

Mistura Betuminosa	Porosidade média dos provetes (%)	Ensaios		
		Grandeza	Provetes imersos 30 min. 60 °C	Provetes imersos 24h 60 °C
MBR – Granitos	3,7	Baridade média (kg/m ³)	2221	2222
		Força de rotura ITS média (kN)	10,378	8,942
		Tensão de rotura ITS média (GPa)	$0,990 \times 10^{-3}$	$0,847 \times 10^{-3}$
		Resistência conservada ITSR (%)	86	
MBR - Seixos	2,5	Baridade média (kg/m ³)	2286	2285
		Força de rotura ITS média (kN)	11,721	7,826
		Tensão de rotura ITS média (GPa)	$1,157 \times 10^{-3}$	$0,777 \times 10^{-3}$
		Resistência conservada ITSR (%)	67	

5. Resultados

5.1. Análise de Resultados dos Estudos

A investigação do comportamento das misturas betuminosas modificadas com betume-borracha em Portugal, teve início em 1999. Ao longo destes anos e com o objectivo de otimizar e melhorar o comportamento estrutural e funcional dessas misturas betuminosas modificadas foram realizados vários estudos, já referidos anteriormente. Do ponto de vista estrutural surge a tentativa de melhorar a resistência ao fendilhamento, retardar a reflexão de fendas, aumentar a vida à fadiga, melhorar a resistência às deformações permanentes e formação de rodeiras. Na perspectiva funcional visa essencialmente reduzir o ruído de circulação, aumentar a aderência pneu/pavimento, reduzir o efeito de projecção de água e reduzir o fendilhamento.

Com a crescente utilização das misturas betuminosas com BMB, por via húmida procedeu-se à homologação através do LNEC para as misturas MBR-BMB (misturas betuminosas rugosas) e MBA-BMB (misturas betuminosas abertas), por solicitação da empresa Recipav. A criação e publicação destes documentos teve em conta os resultados dos ensaios realizados e as observações decorrentes de visitas às instalações de fabrico, a obras em curso e a construções em uso, regras para os seus armazenamentos, transporte e aplicação em obra.

O principal método de fabrico de misturas betuminosas modificadas com BMB, em Portugal, é o método por via húmida no processo *Continuous Blend (In Situ)*. O método passa pela deslocação de uma unidade móvel de produção de BMB para uma central, onde se procederá à mistura final. Visto este tipo de misturas não serem estáveis ao armazenamento são aplicadas imediatamente após o seu fabrico. O processo *Terminal Blend* (refinaria) para o fabrico de misturas com BMB não é muito aplicado em Portugal, pelo que a escassez de estudos não permite fazer uma avaliação dessas mesmas misturas e compará-las com o processo *Continuous Blend*.

No estudo realizado (Dias, 2011) para as misturas com via seca conclui-se que as temperaturas de fabrico apresentam um papel fundamental no desempenho final das misturas, aconselhando-se uma temperatura não superior a 170 °C para o fabrico das mesmas pois induz à queima substancial de uma parte da borracha, reduzindo o sucesso de interacção da borracha com o betume.

Através dos estudos apresentados anteriormente percebe-se que, em Portugal, para o fabrico de misturas betuminosas modificadas para aplicação em pavimentos, são utilizados na maioria betumes modificados com altas percentagens de borracha (18% a 22). Só nos últimos anos é que algumas empresas (Cepsa, Repsol, Probigalp, Lusasfal) começaram a explorar a utilização de misturas betuminosas com percentagens de borracha inferiores (baixa e média percentagens de borracha).

Analisando os estudos para avaliação do módulo de deformabilidade e da resistência à fadiga das misturas betuminosas com BMB em comparação com outro tipo de misturas foi possível concluir que o ensaio mais utilizado foi o de flexão simples em quatro pontos com aplicação de cargas com frequência de 10 Hz e extensão controlada, de acordo com a norma americana AASHTO TP8-94.

Com a definição dos documentos de homologação por parte do LNEC para as misturas MBA-BMB e MBR-BMB, que tinham como base a norma europeia EN 12697-24 (2004), surgiu assim a possibilidade de comparar resultados com procedimentos diferentes. No entanto os estudos ainda não são vastos.

Relativamente aos resultados apresentados durante estes anos, chegou-se à conclusão que as misturas betuminosas modificadas com borracha aplicadas em camadas de desgaste apresentam melhor resistência à fadiga podendo apresentar um valor cerca de 3 a 5 vezes superior quando

comparadas com outros tipos de misturas betuminosas. Concluiu-se também que as misturas com BMB não são muito sensíveis quando submetidas ao envelhecimento em laboratório.

Outras das propriedades analisadas são as deformações permanentes que se definem pela repetida aplicação de cargas o que resulta em depressões nas rodeiras dos veículos, surgindo também elevações laterais. Como se viu no quadro 2.7 estas deformações podem ser de pequeno e grande raio. De pequeno raio surgem normalmente devido apenas às camadas betuminosas e as de grande raio resultam das camadas granulares e fundação (Sousa *et al.*, 2004).

Tal como os ensaios de caracterização do comportamento dos pavimentos à resistência à fadiga, desde 1999 têm sido feitos estudos para caracterizar a resistência das misturas betuminosas modificadas com betume-borracha às deformações permanentes, alguns dos quais salientados na secção 4.3. Verificou-se que a avaliação feita ao longo destes primeiros anos foi essencialmente através do ensaio de simulação de tráfego em pista de laboratório segundo a Norma Espanhola NLT 173-84.

O comportamento das misturas betuminosas relativamente às deformações permanentes pode ter efeitos negativos devido, a uma deficiente compacidade, a tempos de digestão do betume-borracha elevados (superior a 2h:30min), ao armazenamento do betume-borracha por longos períodos de tempo, antes ser misturado aos agregados e a falta de controlo na temperatura que é realizado o processo de digestão.

Outro dos ensaios para avaliação do comportamento das misturas com BMB às deformações permanentes é o ensaio de corte a altura constante, ensaio este, que tem poucos estudos associados de forma a conseguir resultados concretos e susceptíveis de comparação

Em suma e de acordo com a experiência portuguesa as misturas betuminosas modificadas com borracha têm vindo a apresentar melhores resultados em termos de características mecânicas (resistência à fadiga e deformações permanentes) que, por exemplo, misturas convencionais e mesmo que misturas modificadas com polímeros.

A introdução de misturas betuminosas modificadas com borracha teve entre outros objectivos a tentativa de redução do ruído nas estradas. Ao longo desta última década foram realizados vários ensaios para verificar se efectivamente a adição de borracha reduzia os níveis de poluição sonora. De acordo com a experiência portuguesa, tem em conta o método Estatístico de Passagem (ISO 11819-1: 1997). Na análise feita aos estudos referidos podem haver reduções dos níveis de ruído na ordem dos 10 db(A).

Em certos casos de estudo foram ensaiadas amostras, de pavimentos, alguns anos depois de terem sido colocados. Por exemplo, nos primeiros anos as composições de MBR-BMB tinham percentagens de ligante de 7,0% a 8,0% (com 19 a 20% de granulado de borracha adicionado), sendo as misturas formuladas pelo método de Marshall (para 75 pancadas) esperando-se porosidades de 4,0% a 6,0%. Mais recentemente as composições de MBR-BMB apresentam percentagens de ligante de 8,5% a 9,0% (com 20 a 22% de granulado de borracha adicionado), sendo as misturas formuladas pelo método de Marshall (para 75 pancadas) esperando-se porosidades de 4,5% a 6,5%. Posto isto conclui-se que se evoluiu para um “BMB com maior grau de modificação” (Miranda & Fonseca, 2006) e para um aumento do seu teor na mistura, o que pode levar a melhorias relativas à reflexão de fissuras.

No Relatório da Organização Mundial de Saúde (OMS) de 2009 sobre Prevenção Rodoviária a causa de morte devido a acidentes rodoviários passa de 9º lugar em 2004 para 5º lugar em 2030. O aumento da utilização deste tipo de misturas e consequentemente o progresso das características mecânicas e funcionais, poderá melhorar os números apresentados pela OMS.

Uma análise não menos importante é a da aplicação destas misturas modificadas com borracha. Em Portugal o fabrico deste tipo de misturas destina-se sobretudo para aplicação em camadas de

desgaste, sendo pouco explorada a sua utilização em camadas inferiores como, de regularização ou de base.

A tecnologia das misturas betuminosas com borracha tem vindo a ser debatida em vários congressos a nível mundial. Desde 2000 existe o seu próprio congresso denominado *Asphalt Rubber* que é realizado de 3 em 3 anos, tendo sido o primeiro realizado em Portugal. Com a realização destes congressos debatem-se ideias e estudos principalmente com países como os Estados Unidos da América e África do Sul que possuem um maior domínio sobre esta tecnologia.

5.2. Análise Económica

Num panorama actual e com a crise económica a nível mundial, cada vez mais existe um maior rigor no controlo e planeamento de custos. O sector da construção civil e em particular as obras de pavimentação e repavimentação de estradas, é um dos sectores onde se torna importante esse planeamento económico.

Numa empreitada de estradas os custos mais elevados estão ligados à pavimentação. Estes custos subdividem-se em custos associados a materiais, produção, transporte e execução das misturas betuminosas. Ao longo dos anos têm surgido várias soluções para minimizar os custos da pavimentação e maximizar a sua qualidade e execução.

Através da análise e informações descritas nos ensaios referidos percebe-se que a utilização do betume-borracha no fabrico de misturas betuminosas para utilização em pavimentos pode ser uma solução viável quer em termos de características mecânicas e funcionais, quer em termos económicos quando comparadas com misturas convencionais.

Inicialmente as misturas betuminosas modificadas com BMB apresentam custos maiores relativamente às misturas convencionais. Isto deve-se sobretudo a dois factores como, os custos elevados dos processos de obtenção do granulado de borracha e uma maior percentagem de ligante (BMB) usado nas misturas.

Os processos de obtenção de borracha elevam o custo final das misturas modificadas com BMB. No processo criogénico a utilização do azoto líquido é a principal fonte de despesa, tornando os custos de produção elevados. No processo mecânico o processo é mais económico a nível de produção mas exige maior gasto de tempo de energia e produção. A maior percentagem de ligante (BMB) usado nas misturas betuminosas quando comparado com o ligante convencional, leva a um custo superior na mistura betuminosa final, facto este deve-se ao processo de absorção do betume por parte das partículas de borracha, o que leva a um aumento de volume destas partículas e consequentemente uma redução de espaços entre as mesmas provocando um aumento da viscosidade no betume.

As vantagens económicas estão directamente relacionadas com a aplicação destas misturas, modificadas com BMB e com o período de vida útil de uma estrada. De acordo com a experiência Portuguesa a melhoria de propriedades das misturas com BMB como, resistência à fadiga e deformações permanentes, diminuem as intervenções de conservação e manutenção dos pavimentos.

A aplicação deste tipo de misturas com BMB em camadas de desgaste tem sido feita com espessuras inferiores às camadas de desgaste com misturas convencionais. Atendendo às características físicas do BMB e à utilização de elevadas incorporações deste ligante nas misturas betuminosas, a resistência à fadiga destas misturas é superior quando comparada com uma mistura betuminosa convencional, podendo suportar, para o mesmo nível de extensão, cerca de 10 vezes mais aplicações de carga

Existem ainda benefícios económicos indirectamente ligados à produção das misturas BMB. Num panorama ecológico, muitas vezes desprezado, a utilização de pneus usados para modificação dos betumes vem resolver problemas e custos relacionados com os depósitos de pneus.

A seguir são apresentados dois exemplos de análise de custo de uma obra cujos objectivos são, verificar as diferenças do custo final da mesma ao nível da pavimentação e ao mesmo tempo, que cumpram os critérios de ruína, com a aplicação de misturas BMB e misturas convencionais. O primeiro exemplo refere-se à construção de uma nova infra-estrutura rodoviária, enquanto no segundo exemplo é proposta uma intervenção de reabilitação de uma camada de desgaste bastante fissurada.

Exemplo 1

Toma-se como exemplo a execução de uma nova infra-estrutura rodoviária com extensão de 20 km.

No esquema da Fig. 5.1 são apresentadas, a solução base e as soluções alternativas, com base nas soluções previstas no MACOPAV, de forma a comparar o custo final da obra. Para todas as soluções considerou-se um solo de fundação F3, que deve apresentar em média um módulo de deformabilidade entre 80 a 150 MPa e duas camadas de agregados (ABGE) com 20 cm cada. Ao nível das camadas betuminosas optou-se por uma camada base com 10 cm de espessura e uma camada de regularização com 8 cm, ambas em macadame betuminoso. Na camada de desgaste optou-se por colocar na solução base um betão betuminoso com 6cm, perfazendo um total para as camadas betuminosas de 24 cm.

Derivado principalmente da experiência internacional, optou-se por reduzir a espessura na camada de desgaste. Assim, na solução alternativa 1 a única diferença passa por reduzir em 1cm a camada de desgaste, sendo aplicada com um a mistura betuminosas rugosa modificada com BMB, e ficando um total de 23 cm para as camadas betuminosas. Na segunda alternativa é reduzida a espessura em 2 cm relativamente à camada de desgaste da solução base.

Solução Base:	Solução Alternativa 1	Solução Alternativa 2
AC 14 surf ligante (BB) 6 cm	MBR-BMB 5 cm	MBR-BMB 4 cm
AC 20 bin ligante (MB) 8 cm	AC 20 bin ligante (MB) 8 cm	AC 20 bin ligante (MB) 8 cm
AC 20 base ligante (MB) 10 cm	AC 20 base ligante (MB) 10 cm	AC 20 base ligante (MB) 10 cm
Camada de base em agregado britado de granulometria extensa 20 cm	Camada de base em agregado britado de granulometria extensa 20 cm	Camada de base em agregado britado de granulometria extensa 20 cm
Camada de sub-base em material granular britado 20 cm	Camada de sub-base em material granular britado 20 cm	Camada de sub-base em material granular britado 20 cm
Solo de Fundação F3	Solo de Fundação F3	Solo de Fundação F3

Figura 5. 1 - Soluções de pavimentos a estudar

Tendo em conta as soluções previstas no MACOPAV, terá que se definir a estrutura relativamente a algumas acções importantes como, o tráfego, condições de fundação e as características dos materiais de pavimentação.

- Tráfego:
 - Classe de Tráfego (TMDA)_p: T2
 - Nº de Vias: 2 (3,5m cada via)
 - Tipo de Pavimento: Flexível (número de eixos padrão 80 KN)
- Fundação:
 - Classe de Fundação: F3 (Modulo de Deformabilidade – Valor de Cálculo **100 MPa** (MACOPAV, 1995))
 - Coeficiente de Poisson $\nu = 0,40$ (MACOPAV, 1995)
- Materiais de Pavimentação:
 - 1) Camadas Granulares
 - Módulo de deformabilidade: Sub-Base: $E_g = 200 \text{ MPa}$
Base: $E_g = 400 \text{ MPa}$
 - Coeficiente de Poisson $\nu = 0,35$ (MACOPAV, 1995)

Os valores do módulo de deformabilidade para as camadas granulares tiveram como base o MACOPAV, de acordo com o quadro 5.1.

Quadro 5. 1 – Valores para o Módulo de deformabilidade e Coeficiente de Poisson (MACOPAV, 1995)

Materiais Granulares	Módulo de deformabilidade (E)	Coeficiente de Poisson (ν)
Material britado recomposto em central (BGr)	2,5 x E camada inferior	0,35
Material britado de granulometria extensa aplicado em camada de base (BG)	2 x E camada inferior	0,35
Material britado de granulometria extensa aplicado em camada de sub-base (SbG)	2 x E camada inferior	0,35
Material não britado (GN)	1,5 x E camada inferior	0,35
Solo seleccionado (SS)	1,2 x E camada inferior	0,40

- 2) Camadas Betuminosas
 - Módulo de deformabilidade: E_m (MBR-BMB) = **3000 Mpa** (Doc. Aplicação do LNEC, 2008)
 E_m (Mistura Convencional/Macadame) = **4000 Mpa** (As misturas convencionais podem variar muito no seu módulo de deformabilidade, neste caso adoptou-se o valor de 4000 MPa para os vários tipos de camadas, conforme estipulado no MACOPAV (1995))
 - Coeficiente de Poisson $\nu = 0,35$ (MACOPAV, 1995)

Recorrendo ao programa de cálculo ALIZE, determinaram-se as extensões e tensões nas diferentes camadas. Como já foi referido no Capítulo 2, ao longo das camadas betuminosas instalam-se extensões de tracção na parte inferior de cada camada, determinando a rotura por fadiga à tracção das mesmas, sendo máximas na última camada betuminosa. Nas camadas granulares existem esforços de compressão sendo a ligação destas com o solo de fundação do pavimento (onde existe material de menor resistência quanto à deformabilidade) o ponto de menor resistência, provocando deformações permanentes na superfície do pavimento.

Com a utilização de pavimentos flexíveis (eixo-padrão 80 kN) teve que se definir os valores relativos ao carregamento. Para tal adoptou-se o modelo de carregamento da Shell (Fig. 5.2).

Quadro 5. 2 - Definição do eixo relativamente ao carregamento (Silva, 2004)

Eixo	L(mm) ⇔ A (Alize)	r (mm) ⇔ D (Alize)	P (Kpa) ⇔ Q (Alize)
Shell	105	105	600

A – Distância entre rodas: A = 105 mm

D – Área de contacto de cada roda com o pavimento: $D = ((2 \times r) + L) = 315 \text{ mm}$

Q – Carga de contacto: Visto estar a ser usado o eixo padrão de 80 kN, cada roda terá uma carga de 20 kN distribuída pela área da mesma. $\frac{20 \text{ kN}}{\pi \cdot R^2} = 577.4 \text{ kPa} = 5.7 \text{ bar}$

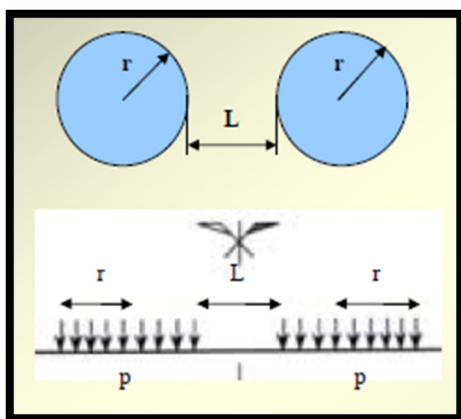


Figura 5. 2 - Modelo de carregamento (Silva, 2004)

Sol. Base				
POSITION DE LA VALEUR MAXIMALE POUR UN JUMELAGE				
A SOUS UNE ROUE SIMPLE				
B SOUS UNE DES ROUES DU JUMELAGE				
C AU CENTRE DU JUMELAGE				
A= 10.500 D= 31.500 Q= 5.700				
NOMBRE DE COUCHES 6				
Z	EPSILON	SIGMAT	EPSILONZ	SIGMAZ
0.00	0.846E-04B*	0.794E+01B*	-0.509E-04C*	0.570E+01A*
E= 40000. NU=0.35 H1= 6.00				
6.00	-0.599E-05A*	0.285E+01B*	-0.269E-04C*	0.485E+01B*
COLLE				
6.00	-0.599E-05A*	0.285E+01B*	-0.269E-04C*	0.485E+01B*
E= 40000. NU=0.35 H2= 8.00				
14.00	-0.259E-04B*	-0.398E+00C*	0.587E-04B*	0.222E+01B*
COLLE				
14.00	-0.259E-04B*	-0.398E+00C*	0.587E-04B*	0.222E+01B*
E= 40000. NU=0.35 H3= 10.00				
24.00	-0.753E-04C*	-0.377E+01C*	0.730E-04B*	0.539E+00B*
COLLE				
24.00	-0.753E-04C*	-0.122E+00C*	0.149E-03B*	0.539E+00B*
E= 4000. NU=0.35 H4= 20.00				
44.00	-0.666E-04C*	-0.265E+00C*	0.103E-03C*	0.236E+00C*
COLLE				
44.00	-0.666E-04C*	-0.690E-01C*	0.139E-03C*	0.236E+00C*
E= 2000. NU=0.35 H5= 20.00				
64.00	-0.601E-04C*	-0.106E+00C*	0.105E-03C*	0.138E+00C*
COLLE				
64.00	-0.601E-04C*	-0.560E-02C*	0.141E-03C*	0.138E+00C*
E= 1000. NU=0.40 H6=INFINI				
D	21.41MM/100		R*D	
R	705.91M		15113.89M*MM/100	

Figura 5. 3 - Resultados obtidos através do programa ALIZE relativos à solução base

Sol. Alternativa 1				
POSITION DE LA VALEUR MAXIMALE POUR UN JUMELAGE				
A SOUS UNE ROUE SIMPLE				
B SOUS UNE DES ROUES DU JUMELAGE				
C AU CENTRE DU JUMELAGE				
A= 10.500 D= 31.500 Q= 5.700				
NOMBRE DE COUCHES 6				
Z	EPSILON	SIGMAT	EPSILONZ	SIGMAZ
0.00	0.925E-04B*	0.704E+01B*	-0.598E-04C*	0.570E+01A*
E= 30000. NU=0.35 H1= 5.00				
5.00	0.316E-04C*	0.369E+01B*	-0.412E-04C*	0.519E+01B*
COLLE				
5.00	0.316E-04C*	0.399E+01B*	-0.436E-04C*	0.519E+01B*
E= 40000. NU=0.35 H2= 8.00				
13.00	-0.236E-04B*	-0.123E+00C*	0.621E-04A*	0.253E+01B*
COLLE				
13.00	-0.236E-04B*	-0.123E+00C*	0.621E-04A*	0.253E+01B*
E= 40000. NU=0.35 H3= 10.00				
23.00	-0.809E-04C*	-0.402E+01B*	0.788E-04B*	0.603E+00B*
COLLE				
23.00	-0.809E-04C*	-0.117E+00C*	0.163E-03B*	0.603E+00B*
E= 4000. NU=0.35 H4= 20.00				
43.00	-0.724E-04C*	-0.286E+00C*	0.112E-03C*	0.260E+00C*
COLLE				
43.00	-0.724E-04C*	-0.730E-01C*	0.152E-03C*	0.260E+00C*
E= 2000. NU=0.35 H5= 20.00				
63.00	-0.653E-04C*	-0.115E+00C*	0.114E-03C*	0.150E+00C*
COLLE				
63.00	-0.653E-04C*	-0.607E-02C*	0.153E-03C*	0.150E+00C*
E= 1000. NU=0.40 H6=INFINI				
D	22.42MM/100		R*D	
R	667.45M		14961.52M*MM/100	
MODULES ET CONTRAINTES EN BARS				

Figura 5. 4 - Resultados obtidos através do programa ALIZE relativos à solução alternativa 1

Sol. Alternative 2
 POSITION DE LA VALEUR MAXIMALE POUR UN JUMELAGE
 A SOUS UNE ROUE SIMPLE
 B SOUS UNE DES ROUES DU JUMELAGE
 C AU CENTRE DU JUMELAGE
 A= 10.500 D= 31.500 Q= 5.700
 NOMBRE DE COUCHES 6

Z	EPSILON	SIGMA	EPSILONZ	SIGMAZ
0.00	0.966E-04B*	0.721E+01B*	-0.634E-04C*	0.570E+01A*
E= 30000. NU=0.35 H1= 4.00				
4.00	0.425E-04C*	0.432E+01B*	-0.513E-04C*	0.538E+01B*
COLLE				
4.00	0.425E-04C*	0.480E+01B*	-0.528E-04C*	0.538E+01B*
E= 40000. NU=0.35 H2= 8.00				
12.00	-0.225E-04B*	0.183E+00B*	0.656E-04A*	0.276E+01B*
COLLE				
12.00	-0.225E-04B*	0.183E+00B*	0.656E-04A*	0.276E+01B*
E= 40000. NU=0.35 H3= 10.00				
22.00	-0.849E-04C*	-0.423E+01B*	0.831E-04B*	0.645E+00B*
COLLE				
22.00	-0.849E-04C*	-0.117E+00C*	0.174E-03B*	0.645E+00B*
E= 4000. NU=0.35 H4= 20.00				
42.00	-0.760E-04C*	-0.299E+00C*	0.117E-03C*	0.274E+00C*
COLLE				
42.00	-0.760E-04C*	-0.758E-01C*	0.160E-03C*	0.274E+00C*
E= 2000. NU=0.35 H5= 20.00				
62.00	-0.682E-04C*	-0.121E+00C*	0.119E-03C*	0.156E+00C*
COLLE				
62.00	-0.682E-04C*	-0.654E-02C*	0.160E-03C*	0.156E+00C*
E= 1000. NU=0.40 H6=INFINI				
D	22.99MM/100		R*D	
R	642.37M			14769.71M*MM/100

MODULES ET CONTRAINTES EN BARS

Figura 5. 5 - Resultados obtidos através do programa ALIZE relativos à solução alternativa 2

Critérios de Ruína

A verificação dos critérios de ruína dos pavimentos propostos, para posterior comparação com os resultados obtidos das extensões nas camadas condicionantes (Figs. 5.3 e 5.4), poderão ser usados os métodos de Nottingham ou o método da Shell. No caso optou-se pelo método da Shell.

Para verificação da resistência à fadiga é utilizada a expressão 2.5, considerando os seguintes valores:

Macadame Betuminoso - $V_b = 9 \%$ (MACOPAV)

E_m - módulo de deformabilidade da última camada betuminosa (macadame betuminoso):

$E_m = 4 \times 10^9$ Pa

Para a classe T2, taxa média de crescimento anual de 5% e factor de agressividade 5, obteve-se para N_{80}^{dim} valor de 7×10^7 (MACOPAV, 1995).

Para verificação da resistência às deformações permanentes é utilizada a expressão 2.6, considerando:

k_s - parâmetro que depende da probabilidade de sobrevivência atribuída no âmbito do dimensionamento do pavimento. Toma o valor de $2,8 \times 10^{-2}$ para 50% de probabilidade de sobrevivência, $2,1 \times 10^{-2}$ para 85% e $1,8 \times 10^{-2}$ para 95%. Optou-se por 95%.

Quadro 5. 3 – Resultados das extensões de tracção e compressão

	ϵ_t (crítica)	ϵ_t (lim)	ϵ_{dp} (crítica)	ϵ_{dp} (lim)
Solução Base	$-0,0750 \times 10^{-3}$	$-0,0830 \times 10^{-3}$	$0,141 \times 10^{-3}$	$0,197 \times 10^{-3}$
S. Alternativa 1	$-0,0809 \times 10^{-3}$	$-0,0830 \times 10^{-3}$	$0,153 \times 10^{-3}$	$0,197 \times 10^{-3}$
S. Alternativa 2	$-0,0849 \times 10^{-3}$	$-0,0830 \times 10^{-3}$	$0,160 \times 10^{-3}$	$0,197 \times 10^{-3}$

Conforme o quadro 5.3 é possível verificar que são satisfeitos os critérios de ruína (resistência à fadiga e deformações permanentes) para a solução base e solução alternativa 1. Na solução alternativa 2 o critério da resistência à fadiga não é satisfeito, verificando-se apenas para as deformações permanentes. A redução de espessura muito contribui para a aproximação dos valores, das soluções propostas, às extensões limite de tracção e compressão, no caso da segunda solução ultrapassando mesmo esse valor.

Considerando os custos de transporte e aplicação iguais seguem-se os seguintes resultados:

Quadro 5. 4 - Características e custos para as diferentes camadas betuminosas

Considerações	Custos/Quantidades
B35/50 Betão Betuminoso (Basalto)	49€/ton
B35/50 Macadame Betuminoso Fuso A	43€/ton
MBR - BMB (alta %)	85€/ton
% Betume-Borracha	9,0% a 10,5%
% Betume 35/50	4,5% a 5,5%

Quadro 5. 5 - Quantidades e Custos das misturas betuminosas em estudo

Quantidades das misturas betuminosas para 20 km		
Camadas	Toneladas	Custo de fabrico p/ camada ⁽¹⁾
Camada c/ Mistura Betão Betuminoso c/ 6 cm	20.000 m x 7,00 m x 0,06 m x 2,42 t/m ³ = 20.328 ton	20.328 ton x 50€ = 1.016.400€
Camada c/ Macadame Fuso A c/ 8 cm	20.000 m x 7,00 m x 0,08 m x 2,34 t/m ³ = 26.208 ton	26.208 ton x 43€ = 1.126.944€
Camada c/ Macadame Fuso A c/ 10 cm	20.000 m x 7,00 m x 0,10 m x 2,34 t/m ³ = 32.760 ton	32.760 ton x 43€ = 1.408.680€
Camada MBR-BMB c/ 5 cm	20.000 m x 7,00 m x 0,05 m x 2,32 t/m ³ = 16.240 ton	16.240 ton x 85€ = 1.380.400€

(1) No custo de fabrico estão incluídos todos os custos unitários dos materiais usados

Custo Total Sol. Base: 3.552.024 €

Custo Total Sol. Alternativa 1: 3.916.024 €

Com base nos valores apresentados nos quadros 5.4 e 5.5, podem-se tirar algumas conclusões acerca das soluções apresentadas. Comparando a solução base com as duas soluções alternativas, a grande diferença é a utilização, nas duas últimas, de misturas betuminosas modificadas com BMB na camada de desgaste incluindo uma redução da espessura das mesmas, 1cm na primeira solução e 2 cm na segunda. Como se pode constatar nos ensaios referidos na secção 4.1 as misturas betuminosas modificadas com borracha apresentam valores de resistência à fadiga superiores aos das misturas convencionais, podendo mesmo chegar até 10 vezes mais. Este facto constitui a razão principal pela qual é habitual considerarem-se reduções de espessura destas misturas. Visto a solução alternativa 2 não cumprir os critérios de ruína não servirá de base para comparação.

Comparando em termos económicos as soluções propostas verifica-se que, no somatório do custo final das camadas betuminosas, entre a solução base e alternativa 1, há uma diferença de 364.000,00 € havendo um aumento de preço final com a aplicação de misturas BMB de 10,24%.

Apesar da redução de espessura os custos finais com a aplicação de misturas com BMB, neste caso, são superiores, facto este deve-se principalmente, ao maior teor de betume e ao preço do mesmo quando incluída a borracha.

Segundo o MACOPAV é possível verificar o período de vida útil do pavimento, sendo feita essa verificação para as soluções que satisfizeram os critérios de ruína. O número acumulado de eixos-padrão é dimensionado para 20 anos, sendo neste primeiro exemplo de 7×10^7 . O valor do número de passagens admissíveis é representado pelas seguintes expressões:

Resistência à Fadiga

ε_t – Extensão de tracção máxima induzida pelo eixo padrão:

Sol. Base: $-0,075 \times 10^{-3}$

Sol Alternativa 1: $-0,0809 \times 10^{-3}$

a – constante: 3×10^{-3}

b – constante: (1/-0,2)

$$N_{adm(t)} = \left(\frac{\varepsilon_t}{a}\right)^b \quad (5.1)$$

Deformações Permanentes

E_{dp} – Extensão de compressão induzida pelo eixo padrão:

Sol. Base: $0,141 \times 10^{-3}$

Sol Alternativa 1: $0,153 \times 10^{-3}$

K_s – $1,8 \times 10^{-2}$

b – constante: (1/-0,25)

$$N_{adm(dp)} = \left(\frac{E_{dp}}{K_s}\right)^b \quad (5.2)$$

Quadro 5. 6 – Número de passagens admissíveis para a solução base e solução alternativa 1

	$N_{dim} (20 \text{ anos})$	$N_{adm(t)}$	$N_{adm(dp)}$	$T \text{ (anos)}$
Sol. Base	7×10^7	$1,024 \times 10^8$	$2,656 \times 10^8$	29,25
Sol. Alternativa 1	7×10^7	$7,012 \times 10^7$	$1,915 \times 10^8$	20

Como se pode observar no quadro 5.6, em ambas as soluções o número de acumulado de eixos padrão é menor para o critério de ruína à fadiga logo será este o critério crítico. De acordo com os resultados verifica-se que a solução base apresenta maior período de vida útil relativamente à solução alternativa. A maior espessura e módulo de deformabilidade estão nessa origem. No outro caso a redução de espessura leva a um período de vida útil igual ao período base de dimensionamento (20 anos). Apesar da diferença de preços a utilização das misturas com BMB pode ser vantajosa a longo prazo devido à menor manutenção a que estão sujeitos estes pavimentos.

Exemplo 2

Neste exemplo opta-se por avaliar o custo final da reabilitação de uma estrada com 20 km e a sua durabilidade após essa reabilitação. O pavimento a reabilitar apresenta, uma fundação F3 que deve ter em média um módulo de deformabilidade entre 80 a 150 MPa, uma camada de agregado britado de granulometria extensa (ABGE) com uma espessura total de 30 cm e uma camada de desgaste, a qual, se encontra com um nível de fendilhamento bastante elevado. Para a intervenção de reabilitação desta estrada são propostas duas soluções. Em ambas, primeiro é executada uma fresagem de 5 cm ficando a camada betuminosa fendilhada com a espessura final de 10 cm. Posteriormente é feita a aplicação de uma Membrana Anti-Propagação de Fendas (SAMI) com 1,2 cm sendo o seu custo final igual para ambas as soluções. Esta membrana tem o objectivo de retardar o desenvolvimento das fendas impedindo que se propaguem para a nova camada de desgaste. Na camada de regularização é onde se verifica a diferença das duas soluções. Na primeira (Reabilitação 1) é aplicada uma camada de macadame betuminoso com 6 cm de espessura e na segunda (Reabilitação 2) é aplicada uma camada de mistura betuminosa rugosa com BMB com uma espessura de 3 cm. Por fim é aplicada a camada de desgaste, em ambas as soluções, com 4 cm de espessura. O esquema da figura abaixo representa o tipo de pavimento em causa assim como as soluções de reabilitação.

Reabilitação 1	Reabilitação 2
Camada de Desgaste Betão Betuminoso c/ 4cm	Camada de Desgaste Betão Betuminoso c/ 4cm
Camada de Reg. Macadame Betuminoso Fuso A c/ 6cm	Camada de Reg. MBR-BMB c/ 3cm
SAMI c/ 1,2 cm	SAMI c/ 1,2 cm
Mistura Betuminosa em Betão Betuminoso (Fendilhado) c/ 10cm (após fresagem de 5cm)	Mistura Betuminosa em Betão Betuminoso (Fendilhado) c/ 10cm (após fresagem de 5cm)
Camada Base ABGE c/ 30 cm	Camada Base ABGE c/ 30 cm
Fundação F3	Fundação F3

Figura 5. 6 - Esquema representativo das duas soluções de reabilitação

Tendo em conta as soluções previstas no MACOPAV, terá que se definir a estrutura relativamente às acções do tráfego, condições de fundação e as características dos materiais de pavimentação.

- Tráfego:

- Classe de Tráfego (TMDA)_p: T3
- Nº de Vias: 2 (3,5m cada via)
- Tipo de Pavimento: Flexível (número de eixos padrão 80 kN)

- Fundação:

- Classe de Fundação: F3 (Módulo de Deformabilidade - Valor de Cálculo, **100 MPa** (MACOPAV))
- Coeficiente de Poisson $\nu = 0,40$ (MACOPAV, 1995)

- Materiais de Pavimentação:

- 1) Camadas Granulares

- Módulo de deformabilidade: Base (ABGE): $E_g = 300 \text{ MPa}$
- Coeficiente de Poisson $\nu = 0,35$ (MACOPAV, 1995)

- 2) Camadas Betuminosas

- Módulos de deformabilidade: E_m (MBR-BMB) = **3000 Mpa** (Valor médio) (Doc. Aplicação do LNEC, 2008)
- E_m Mistura em Betão betuminoso existente (Fendilhado) = **1000 Mpa**
- E_m Mistura em Betão betuminoso a colocar = **4000 Mpa**
- E_m Mistura Macadame betuminoso a colocar = **4000 Mpa**

- Coeficiente de Poisson $\nu = 0,35$ (MACOPAV, 1995)

Recorrendo ao programa de cálculo ALIZE, determinaram-se as extensões e tensões nas diferentes camadas. Tal como no primeiro exemplo com a utilização de pavimentos flexíveis (eixo-padrão 80 kN) teve que se definir os valores relativos ao carregamento. Para tal adoptou-se novamente o modelo de carregamento da Shell cujos valores estão calculados no primeiro exemplo.

Reab.1					
POSITION DE LA VALEUR MAXIMALE POUR UN JUMELAGE					
A SOUS UNE ROUE SIMPLE					
B SOUS UNE DES ROUES DU JUMELAGE					
C AU CENTRE DU JUMELAGE					
A= 10.500 D= 31.500 Q= 5.700					
NOMBRE DE COUCHES 5					

Z		EPSILONT	SIGMAT	EPSILONZ	SIGMAZ
0.00*		0.149E-03B*	0.115E+02B*	-0.827E-04C*	0.570E+01A*
	E= 40000.				
	NU=0.35				
	H1= 4.00				
4.00*		0.365E-04C*	0.426E+01B*	-0.411E-04C*	0.488E+01B*
	COLLE----				
4.00*		0.365E-04C*	0.426E+01B*	-0.411E-04C*	0.488E+01B*
	E= 40000.				
	NU=0.35				
	H2= 6.00				
10.00*		-0.105E-03B*	-0.472E+01B*	0.135E-03A*	0.237E+01B*
	COLLE----				
10.00*		-0.105E-03B*	-0.296E+00C*	0.245E-03B*	0.237E+01B*
	E= 10000.				
	NU=0.35				
	H3= 10.00				
20.00*		-0.157E-03C*	-0.161E+01B*	0.188E-03B*	0.894E+00B*
	COLLE----				
20.00*		-0.157E-03C*	-0.154E+00C*	0.318E-03B*	0.894E+00B*
	E= 3000.				
	NU=0.35				
	H4= 30.00				
50.00*		-0.112E-03C*	-0.364E+00C*	0.164E-03C*	0.249E+00C*
	COLLE----				
50.00*		-0.112E-03C*	-0.130E-01C*	0.255E-03C*	0.249E+00C*
	E= 1000.				
	NU=0.40				
	H5=INFINI				

D	29.27MM/100			R*D	
R	322.29M				9432.12M*MM/100

MODULES ET CONTRAINTES EN BARS					

Figura 5. 7 - Resultados obtidos através do programa ALIZE relativos à reabilitação 1

Reab.2					
POSITION DE LA VALEUR MAXIMALE POUR UN JUMELAGE					
A SOUS UNE ROUE SIMPLE					
B SOUS UNE DES ROUES DU JUMELAGE					
C AU CENTRE DU JUMELAGE					
A= 10.500 D= 31.500 Q= 5.700					
NOMBRE DE COUCHES 5					

Z		EPSILONT	SIGMAT	EPSILONZ	SIGMAZ
0.00*		0.185E-03B*	0.136E+02B*	-0.837E-04B*	0.570E+01A*
	E= 40000.				
	NU=0.35				
	H1= 4.00				
4.00*		-0.134E-04A*	0.232E+01B*	-0.331E-04C*	0.469E+01B*
	COLLE----				
4.00*		-0.134E-04A*	0.238E+01B*	-0.297E-04C*	0.469E+01B*
	E= 30000.				
	NU=0.35				
	H2= 3.00				
7.00*		-0.110E-03B*	-0.301E+01A*	0.185E-03A*	0.349E+01B*
	COLLE----				
7.00*		-0.110E-03B*	0.280E+00B*	0.327E-03A*	0.349E+01B*
	E= 10000.				
	NU=0.35				
	H3= 10.00				
17.00*		-0.195E-03C*	-0.201E+01B*	0.244E-03B*	0.122E+01B*
	COLLE----				
17.00*		-0.195E-03C*	-0.155E+00C*	0.421E-03B*	0.122E+01B*
	E= 3000.				
	NU=0.35				
	H4= 30.00				
47.00*		-0.134E-03C*	-0.431E+00C*	0.193E-03C*	0.296E+00C*
	COLLE----				
47.00*		-0.134E-03C*	-0.150E-01C*	0.301E-03C*	0.296E+00C*
	E= 1000.				
	NU=0.40				
	H5=INFINI				

D	32.34MM/100			R*D	
R	226.83M				7335.24M*MM/100

MODULES ET CONTRAINTES EN BARS					

Figura 5. 8 - Resultados obtidos através do programa ALIZE relativos à reabilitação 2

Critérios de Ruína

Optou-se novamente pelo método da Shell. Neste caso e pelo facto de tratar-se de uma obra de reabilitação considerou-se um período de dimensionamento de 10 anos. Para a classe T3 obteve-se para N_{80}^{dim} valor de $1,6 \times 10^7$ (MACOPAV, 1995). Este valor foi calculado através das expressões 5.3 e 5.4.

$$N_{80}^{dim} = 365 \times (TMDA)_p \times C \times \alpha \times p \quad (5.3)$$

$$C = \frac{(1+t)^p - 1}{p \times t} \quad (5.4)$$

N_{80}^{dim} – número acumulado de passagens eixo padrão

t - taxa média de crescimento anual: 4%

α - factor de agressividade: 4,5

p – período de dimensionamento: 10 anos

C – factor de crescimento de tráfego (expressão 5.7)

Para verificação da resistência à fadiga é novamente utilizada a expressão 2.5 considerando os seguintes valores:

Macadame Betuminoso - $V_b = 9 \%$ (MACOPAV)

E_m - módulo de deformabilidade da última camada betuminosa (Macadame Betuminoso):

$E_m = 4 \times 10^9$ Pa

Para verificação da resistência às deformações permanentes é utilizada a expressão 2.6 considerando os seguintes valores:

k_s – parâmetro que depende da probabilidade de sobrevivência atribuída no âmbito do dimensionamento do pavimento. Toma o valor de $2,8 \times 10^{-2}$ para 50% de probabilidade de sobrevivência, $2,1 \times 10^{-2}$ para 85% e $1,8 \times 10^{-2}$ para 95%. Optou-se por 85%.

Quadro 5. 7 - Resultados das extensões de tracção e compressão

	ϵ_t (crítica)	ϵ_t (lim)	ϵ_{dp} (crítica)	ϵ_{dp} (lim)
Reab. 1	$-0,105 \times 10^{-3}$	$-0,111 \times 10^{-3}$	$0,255 \times 10^{-3}$	$0,332 \times 10^{-3}$
Reab. 2	$-0,110 \times 10^{-3}$	$-0,111 \times 10^{-3}$	$0,301 \times 10^{-3}$	$0,332 \times 10^{-3}$

De acordo com os resultados obtidos (Figs. 5.7 e 5.8) para as extensões, ambas as soluções verificam os critérios de ruína (resistência à fadiga e deformações permanentes) e com valores muito próximos (Quadro 5.7).

Nesta reabilitação são considerados os custos da execução de fresagem e da aplicação de uma Membrana Anti-Propagação de Fendas (SAMI) para as duas soluções sendo o seu custo final igual, pelo que os valores apresentados no quadro seguinte referem-se apenas às camadas betuminosas a aplicar.

Quadro 5. 8 – Custo referente às diferentes camadas a aplicar na reabilitação do pavimento

Quantidades das misturas betuminosas para Reabilitação de 20 km		
Camadas	Toneladas	Custo de fabrico p/ camada ⁽¹⁾
Camada c/ Mistura Betão Betuminoso c/ 4 cm	20.000 m x 7,00 m x 0,04 m x 2,42 t/m ³ = 13.552 ton	13.552 ton x 49€ = 664.048€
Camada c/ Macadame Fuso A c/ 6 cm	20.000 m x 7,00 m x 0,06 m x 2,34 t/m ³ = 19.656 ton	19.656 ton x 43€ = 845.208€
Camada MBA-BMB c/ 3 cm	20.000 m x 7,00 m x 0,03 m x 2,32 t/m ³ = 9.744 ton	9.744 ton x 85€ = 828.240€

(1) No custo de fabrico estão incluídos todos os custos unitários dos materiais usados

Custo Reab. 1: 1.509.256 €

Custo Reab. 2: 1.492.288 €

Assim faz-se uma avaliação de custo apenas ao nível das duas camadas novas a colocar. Através do quadro acima verifica-se uma diferença de 16.968,00 €, ou seja, uma redução na ordem dos 1,12%. A redução de 3 cm na espessura da primeira camada betuminosa a aplicar foi determinante para esta redução de custo.

Com base nos resultados conclui-se que a redução da espessura tem uma influência muito significativa, pois reduz a quantidade de misturas a aplicar e com isso a redução de custos no final de uma obra, neste caso de reabilitação. De acordo com a experiência internacional e também portuguesa a menor manutenção que estão sujeitas as estradas, devido às boas características mecânicas das misturas BMB é também um factor de redução de custos a longo prazo.

À redução de espessura aplicada neste tipo de misturas, podem estar associados ganhos, por exemplo, na redução da utilização de recursos naturais, no caso dos agregados, que por sua vez permite uma economia de combustível devido ao transporte. A redução de espessura permite também diminuir o tempo necessário para fazer a obra o que implica redução de custos ao nível das instalações (estaleiros) e de mão-de-obra

Segundo o MACOPAV é possível verificar a durabilidade do pavimento. O número acumulado de eixos-padrão é dimensionado para 10 anos, sendo neste segundo exemplo de $1,6 \times 10^7$. O valor do número de passagens admissíveis é representado pelas expressões 5.1 e 5.2 considerando os valores críticos de extensão de tracção e compressão da reabilitação 1 do quadro 5.7.

Quadro 5. 9 - Número de passagens admissíveis para a reabilitação 1

	N _{dim} (10 anos)	N _{adm} (t)	N _{adm} (dp)	T (anos)
Reabilitação 1	$1,6 \times 10^7$	$1,904 \times 10^7$	$4,599 \times 10^7$	11,9
Reabilitação 2	$1,6 \times 10^7$	$1,509 \times 10^7$	$2,369 \times 10^7$	9,4

De acordo com os resultados apresentados nas figuras 5.7 e 5.8, em ambas as soluções o número de acumulado de eixos-padrão é menor para o critério de ruína à fadiga logo será este o critério crítico (Quadro 5.9). É possível observar também os valores de números acumulados de eixo-padrão estão muito próximos do valor base (para 10 anos), sendo viável, qualquer uma das reabilitações. É também de esperar que os valores apresentados para a vida útil do pavimento sejam menores do que os calculados devido à reflexão de fendas da camada anterior. Para tal e com os resultados em

ensaios já verificados, a solução com misturas modificadas com borracha pode ser mais vantajosa, quer economicamente quer estruturalmente. Com a introdução da borracha tem-se uma mistura mais elástica e consequentemente consegue impedir, que a fendilhação existente na camada betuminosa se propague para a superfície, mais rapidamente.

Numa análise aos dois exemplos, constata-se que a utilização de misturas betuminosas modificadas com borracha é economicamente mais vantajosa quando se trata de obras de reabilitação de estradas. A construção de novas infra-estruturas rodoviárias e de acordo com o primeiro exemplo é desvantajoso economicamente proceder à aplicação de misturas com BMB em camadas de desgaste.

5.3. Vantagens e Desvantagens de misturas com BMB

5.3.1. Vantagens Estruturais e Funcionais

- Aumento da vida útil do pavimento pois têm bom comportamento na resistência à fadiga e a deformações permanentes;
- Diminuição do ruído devido à circulação do tráfego, o que leva cada vez mais à aceitação da utilização destes pavimentos em zonas urbanas;
- Redução do atrito pneu/pavimento, dando uma maior comodidade aos utilizadores.

5.3.2. Vantagens Ambientais

- Redução do impacte ambiental com reciclagem de pneus de forma limpa e ecológica, evitando assim os seus depósitos ou incineração;
- Redução na espessura das camadas de desgaste e de ligação a aplicar, o que diminui o uso de agregados logo contribui para a redução do impacte ambiental negativo das pedreiras e evitam a necessidade de abertura de novas pedreiras (Pereira, 2002);
- Reciclabilidade no final de vida de serviço;
- Redução do impacte paisagístico associado à menor presença das barreiras acústicas, na proximidade de habitações.

5.3.3. Vantagens Económicas

- Custos de manutenção consideravelmente mais baixos relativamente às misturas convencionais, pois o aumento da elasticidade confere maior resistência às fissuras logo maior durabilidade;
- Com a utilização de um produto reciclado, há uma redução de custos relacionados com a extracção de matérias-primas e as emissões de dióxido de carbono (Cristino, 2010);
- Diminuição de áreas e mesmo eliminação de barreiras acústicas;
- Redução de custos no final de uma obra com a redução de espessuras nas camadas betuminosas e associada a essa redução de espessura podem estar associados ganhos por exemplo na redução da utilização de recursos naturais, no caso dos agregados, que por sua vez permite uma economia de combustível devido ao transporte. A redução de espessura permite também diminuir o tempo necessário para fazer a obra o que implica redução de custos ao nível das instalações (estaleiros) e de mão-de-obra.

5.3.4. Desvantagens

- O armazenamento em “condições estáticas” (4 dias a 130°C) afecta de forma negativa as propriedades do BMB pois poderá dar-se uma segregação entre o betume puro e o granulado de borracha verificando-se com isso um mau desempenho do BMB em relação às deformações permanentes (Pereira, 2002);
- Os tempos de espera para abertura de passagem a veículos são superiores às misturas convencionais. O não cumprimento destes tempos de espera para arrefecimento, pode levar o pavimento à formação de rastos (Pereira, 2002);

6. Conclusões

6.1. Considerações Finais

Numa rede rodoviária o pavimento constitui a infra-estrutura mais importante, sendo aquela que está sujeita a acções mais rigorosas, quer do tráfego quer do clima. Como tal, é para esta componente da rede rodoviária que se dirigem os maiores investimentos de construção, conservação e reabilitação e, por consequência, são realizados os maiores investimentos em investigação. Os pavimentos rodoviários são dimensionados para responderem às solicitações do tráfego e do clima durante um determinado período de vida (20 a 30 anos), de modo a oferecerem condições de circulação confortáveis e seguras.

Com o objectivo de melhorar o desempenho dos pavimentos flexíveis, tem-se realizado um número cada vez maior de pesquisas sobre novos materiais que possam aumentar a sua vida útil e diminuir os custos de manutenção. Uma alternativa que tem sido estudada nos últimos anos em Portugal é a adição de borracha aos ligantes betuminosos.

Cada vez mais em Portugal se utiliza misturas betuminosas modificadas com BMB. Com a realização de vários estudos e experiência de aplicação as empresas começam a acreditar num produto que em alguns países (EUA e África do Sul) já têm uma vasta história de aplicações e estudos.

Com o desenvolvimento desta mistura com BMB e com os bons resultados obtidos ao longo dos anos deu-se a sua introdução no Caderno de Encargos tipo, de obras a realizar em Portugal. Com a referência dos resultados dos estudos, foi possível a obtenção de valores base para a formulação das misturas.

Em Portugal os primeiros ensaios para caracterização dos betumes modificados foram realizados com base em normas americanas e europeias. Ao longo destes últimos anos têm sido feitas adaptações de normas europeias para portuguesas. Com o desenvolvimento desta mistura com BMB, no ano de 2010 foi apresentada a pré-norma Portuguesa prNP 4501: 2010 – “Betume Borracha, Requisitos para betumes com borracha reciclada de pneus usados”, que tem como objectivo indicar os requisitos para os betumes-borracha a utilizar na construção e manutenção de estradas, aeroportos e outras áreas pavimentadas.

Como foi possível verificar, nos estudos realizados em Portugal as misturas betuminosas modificadas com borracha proveniente de pneus usados obtiveram muito bons resultados no que diz respeito à resistência à fadiga, deformações permanentes e ruído. Estes resultados vieram confirmar os resultados já obtidos em alguns países principalmente nos Estados Unidos da América.

Na construção de novas vias, a utilização do BMB nas misturas betuminosas para aplicação da camada de desgaste poderá surgir em conjunto com bases ou leitos de pavimentos tratados com cimento, uma vez que a sua elevada resistência à propagação de fissuras, assegura estruturas de pavimentos muito mais económicas do que as estruturas convencionais, além de diminuir o recurso sistemático à utilização das britas (Recipav, 2009).

Os principais métodos de modificação dos betumes pela adição de borracha são o método de via húmida e via seca. O utilizado em Portugal é o método da via húmida que pode dividir-se em dois tipos de fabrico, o fabrico “*in situ*” (*continuous blend*) e em refinaria (*terminal blend*). As misturas com alta percentagem de borracha estão associadas ao método de fabrico *continuous blend* pois não são estáveis ao armazenamento. Por outro lado as misturas com média e baixa percentagem de borracha estão associadas ao método *terminal blend* pois a sua estabilidade ao armazenamento é boa.

Do ponto de vista económico e tendo presente as características estruturais e funcionais referidas, constata-se que a utilização destas misturas betuminosas em obras de reabilitação de pavimentos, representa custos de construção inferiores ou semelhantes quando se compara com as misturas betuminosas convencionais, como se pôde comprovar no exemplo 2 da análise económica. Relativamente a construção de novas infraestruturas rodoviárias (exemplo 1) a utilização deste tipo de misturas com BMB apresenta custos superiores às misturas convencionais.

6.2. Investigação Futura

O método denominado de “Via Seca” na produção de betumes modificados com borracha tem, em Portugal, uma linha de investigação reduzida apenas com um estudo, pelo que a continuidade poderá ser vantajoso para fins de comparação com o método da via húmida.

A exploração deste tipo de modificações nos betumes com borracha e por sua vez das misturas betuminosas podia ser alargado a camadas inferiores à camada de desgaste, como as camadas de regularização.

As misturas betuminosas com betumes modificados com média e baixa percentagem de borracha têm ainda, em Portugal, poucas aplicações. Seria benéfico aprofundar o estudo do comportamento mecânico destas misturas e os custos associados à construção de novas infra-estruturas rodoviárias de forma a perceber se são estruturalmente e economicamente mais vantajosas do que as misturas convencionais.

Referências Bibliográficas

ABREU, T. J. N.; COELHO, J. L. B. – *Auto-Estrada Ericeira/Mafra/Malveira, Medidas de Minimização do Ruído: Estudo Acústico*. Acoustic Control, 2007.

ALMEIDA, Maria S. F. D. – *Pavimentos Rodoviários de Baixo Custo com Emulsões Betuminosas e Resíduos das Minas da Panasqueira* - Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2003.

ANTUNES, I.; GIULIANI, F.; SOUSA, J.B. – *Caracterização reológica de betumes modificados CRM sujeitos a envelhecimento artificial*, 2004.

ANTUNES, M. L.; BAPTISTA, F. A.; EUSÉBIO, M. I.; COSTA, M. – *Caracterização de misturas betuminosas utilizando betume modificado com borracha. 1º Congresso Rodoviário Português*, 28-30 Novembro 2000 – LNEC, vol. III, pp. 395-409.

ANTUNES, M. L.; BAPTISTA, F. A.; DOMINGOS, P.; FONTUL, S.; . – *Conservação e reabilitação de pavimentos rodoviários*. LNEC, 2005.

ANTUNES, M. L.; FREIRE, A. C. – *Avaliação do comportamento à deformação permanente da misturas betuminosas com base nas novas normas de ensaio europeias. 4º Congresso Rodoviário Português*, 2006.

ANTUNES, M. L.; BAPTISTA, F. A.; FONSECA, P. – *A Homologação de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha*, 2006.

AZEVEDO, M. C. – *Construção de Pavimentos. Indicadores do estado de conservação dos pavimentos*. Disposições Normativas. INIR, 2011.

AZINHEIRAGATE – *Azinheiragate.Blogspot*, Abril 2008. Disponível em <http://azinheiragate.blogspot.com/2008/04/o-problema-ambiental-da-deposio-ilegal.html> (Maio 2011).

BAPTISTA, F. A.; ANTUNES, M. L.; FONSECA, P. - *Avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas com betume modificado com alta percentagem de borracha*, 2008.

BAPTISTA, F. A.; ANTUNES, M. L.; FONSECA, P. – *Desempenho de Misturas Betuminosas com BMB aplicadas em Portugal*. IV Congresso Rodoviário Português, 2006.

BAPTISTA, F. A.; ANTUNES, M. L.; EUSÉBIO, M. I.; COSTA, M. – *Misturas com betume borracha de alta viscosidade: contribuição para a elaboração de especificações técnicas*. LNEC, 2010.

BRANCO, F.; PEREIRA, P.; SANTOS, L.P. – *Pavimentos Rodoviários*. Edições Almedina SA., 2008.

CAMPOS, Paulo da Silva – *Aproveitamento industrial da borracha reciclada de pneus usados (a reciclagem do resíduo 160103 da L.E.R.)*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Gestão Ambiental. Universidade do Minho, Dezembro 2006.

CETO-EP - *Caderno de Encargos tipo obra – Pavimentação, Características dos materiais*. Cap. 14.03, ESTRADAS DE PORTUGAL, SA. Janeiro, 2012.

CETO-EP - *Caderno de Encargos tipo obra – Pavimentação, Métodos Construtivos*. Cap. 15.03, ESTRADAS DE PORTUGAL, SA Fevereiro 2009.

CEPSA – *Fichas Técnicas Cepsa, Betume Borracha BMB-2 e BMB-3b*, 2010. Disponível em www.cepsa.pt (Dezembro 2010).

CRISTINO, Pedro – *Há borracha no Asfalto*. Revista Construir, pp. 46-47, Construir Editor, Setembro 2010.

DECRETO-LEI nº 43/2004. D.R. 1º Série – A nº 52 (2004-03-02) págs. 1108-1109.

DECRETO-LEI nº 111/2001. D.R. 1º Série – A nº 82 (2001-04-06) págs. 2046-2050.

DECRETO-LEI nº 7/2007. *Regulamento Geral do Ruído* - D.R. 1º Série – nº 12 (2007-01-17) págs. 390-398

DIAS, José Luís Feiteira – *Misturas Betuminosas Incorporando por Via Seca Borracha de Pneus Usados. Caracterização e Validação Tecnológica*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil na Especialidade de Urbanismo, Ordenamento do Território e Transportes. Universidade de Coimbra – FCT, 2011.

FONSECA, Paulo – *Misturas Betuminosas Modificadas com Borracha Reciclada de Pneus: Ligantes com Elevado Conteúdo de Borracha*. Recipav, 2006.

FONTES, Liseane P. T. L. – *Optimização de misturas betuminosas com betumes modificados com borracha para reabilitação de pavimentos*. Dissertação de Doutoramento, Universidade do Minho/Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

FONTES, L. P. T. L.; PEREIRA, P. A. A.; PAIS, J. C.; TRICHÊS, G. – *Performance of Wet Process Method Alternatives: Terminal or Continuous Blend*. University Federal of Santa Catarina e Universidade do Minho, 2006.

FREIRE, A. C.; ANTUNES, M. L.; BAPTISTA, F. A.; DOMINGOS, P.; – *Agregados para misturas betuminosas*, LNEC. Palestra, Universidade Nova de Lisboa – Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2004.

FREITAS, Elisabete F. – *Contribuição da superfície dos pavimentos para a produção de ruído*. Universidade do Minho, 2008.

GOMES, M. M. – *Borracha Natural (NR)*, s/d. Disponível em <http://www.rubberpedia.com/borrachas/borracha-natural.php> (Janeiro 2011).

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (IPQ) – NP 13043:2004 – *Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação*, IPQ, Agosto 2004.

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (IPQ) – NP EN 12591:2006 – *Betumes e ligantes betuminosos – Especificações para betumes de pavimentação*, IPQ, 2006.

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (IPQ) – NP EN 13108:2011 – *Misturas Betuminosas – Especificações dos materiais, Parte 1: Betão Betuminoso*, IPQ, 2011.

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (IPQ) – prNP 4501:2010 – *Betume Borracha – Requisitos para betumes com borracha de pneus usados*, IPQ, Agosto 2010.

LNEC – DA 3 - MBA-BMB – *Misturas Betuminosas para Pavimentos Rodoviários e Aeroportuários*. Documento de Aplicação, 2006.

LNEC – DA 15 - MBR-BMB – *Misturas Betuminosas para Pavimentos Rodoviários e Aeroportuários*. Documento de Aplicação, 2008.

LNEC - Disponível em <http://www.lnec.pt>, (Setembro, 2011).

LNEC_A - Disponível em <http://www.lnec.pt>, (Janeiro, 2012).

LUCAS, F.; NUNES, H.; PÁEZ, A. – *Betumes com pó de borracha de pneu fora de uso produzidos por via húmida em fábrica: Betumes melhorados (BC), Betumes modificados (BMC) e Betumes de alta viscosidade (BMAVC)*. Repsol, 2008.

MACOPAV – *Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional*, 1995.

MIRANDA, C. V.; FONSECA, P. – *Critérios para Rentabilizar o recurso a BMB em reabilitações funcionais*, 2006.

MIRANDA, H.; NEVES, J.; BAPTISTA, F.; ANTUNES, M. L.; FONSECA, P – *Desempenho de misturas betuminosas com borracha: Estudo da resistência à fadiga segundo a norma EN 12697-24*, 2008.

NEVES, J. M. C.; CORREIA, A. G. - *Caracterização da Rigidez de Misturas Betuminosas em Ensaios de Tracção Indirecta por Compressão Diametral de Provetes Cilíndricos*. 2006.

NUNES, H.; LUCAS, F.; BARDESI, A. – *Betumes de baixo e médio teor de pó de borracha de pneu*. Repsol.

PAMPULIM, Vasco - *Workshop GPPQ e AIP, O 7ºPQ e os Mercados Internacionais - Instrumentos Europeus de Apoio à IDT*. RECIPNEU, 2010.

PAIS, J.; PEREIRA, P.; MARICATO, S.; MOURA, J. – *Desempenho de misturas betuminosas abertas e fechadas com betume modificado com baixa percentagem de borracha*, 2008.

PEREIRA, P.; PAIS J.; MINHOTO M. – *A optimização das misturas betuminosas com betume modificado com borracha reciclada de pneus usados*. 2º Congresso Rodoviário Português, 18-20 Novembro 2002 – LNEC, vol. II, pp. 257-268.

PESTANA, C.; PEREIRA, P.; PAIS, J.; PEREIRA, P. A. – *Reabilitação de pavimentos utilizando misturas betuminosas com betumes modificados*, Auto-Estradas do Atlântico, 2006.

PROBIGLAP – Disponível em <http://www.probigalp.pt>, (Janeiro, 2011).

QUARESMA, L. M.; FREIRE, A. C.; PINELO, A. - *Ensaio para Caracterização de uma Mistura Betuminosa com o Produto BMB*. Relatório 212/99 – NPR, LNEC. Agosto 1999.

RECIPAV – *A utilização do betume modificado com borracha reciclada de pneus em Portugal*, 2008. Disponível em <http://www.recipav.pt>, (Outubro, 2010).

RECIPAV - *Experiência de obras em Portugal - BMB 10 anos em Portugal*. 2ª Jornadas Cepsa Betumes/CRP, Julho 2009. Disponível em <http://www.recipav.pt>, (Outubro, 2010).

RECIPAV - *Das melhorias ambientais às oportunidades económicas*. 4º Fórum Nacional de Resíduos, Abril 2010. Disponível em <http://www.recipav.pt>, (Outubro, 2010).

RECIPAV – *Experiência Betume Modificado com Borracha reciclada de pneus em Portugal*, 2005.

RECIPAV – Ficha Técnica 2/04 – MBR-BMB, Novembro 2004 Disponível em <http://www.recipav.pt>, (Outubro, 2010)

RECIPAV – Ficha Técnica 3/04 – MBA-BMB, Novembro 2004 Disponível em <http://www.recipav.pt>, (Outubro, 2010)

RECIPAV – Ficha Técnica 4/04 – SAMI-BMB, Novembro 2004 Disponível em <http://www.recipav.pt>, (Outubro, 2010).

RECIPNEU – Disponível em <http://www.recipneu.pt>, (Outubro, 2010).

REPSOL – *Betumes Melhorados com Borracha*, Novembro 2007. Disponível em www.repsol.com (Dezembro 2010)

RUIVO, Fernando Palma - *Ensaio acústico de pavimentos, Pavimento B.M.B versus Pavimentos B.A.C.* . CERTIPROJECTO, LDA. Auto-Estradas do Atlântico, 2004

RUIVO, Fernando Palma - *Ensaio acústico de pavimentos, Pavimento B.M.B versus Pavimentos B.B.R.* . CERTIPROJECTO, LDA. Auto-Estradas do Atlântico, 2004

SILVA, Hugo Manuel – *Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique. Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas*, Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil – Vias de Comunicação. Universidade do Minho, 2006.

SILVA, João Pedro – *Vias de Comunicação II* – DEC-ESTL, Instituto Politécnico de Leiria, 2004.

SOUSA, J.; FONSECA, P.; FREIRE, A.; PAIS, J. – *Comparação da vida à fadiga e deformação permanente entre misturas com betume modificado com borracha reciclada de pneus e convencionais*, 2004.

TEXTOS CIENTÍFICOS – *Hidrocarburos en la Construcción*, Junho 2008. Disponível em <http://www.textoscientificos.com/quimica/hidrocarburos/construccion> (Maio, 2011).

VALORPNEU – Disponível em <http://www.valorpneu.pt> (Novembro, 2010)

VALORPNEU_A – *Relatório Anual & Contas 2009*. Disponível em <http://www.valorpneu.pt> (Novembro, 2010).

VALORPNEU_A – *Relatório Anual & Contas 2010*. Disponível em <http://www.valorpneu.pt> (Dezembro, 2011).

Vias Romanas – *Vias Romanas em Portugal*. Disponível em <http://viasromanas.planetaclix.pt/vrinfo.html#estradas> (Julho 2011).

VICENTE, Ana Margarida Madeira – *A utilização de betumes modificados com borracha na reabilitação de pavimentos flexíveis*. Dissertação de Mestrado em Vias de Comunicação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.